

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí

Surfacing Sealing Areas of Armatures from Duplex Stainless Steel

Student:

Bc. Jindřich Kozák

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jindřich Kozák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí**
Surfacing Sealing Areas of Armatures from Duplex Stainless Steel

Zásady pro vypracování:

1. Posouzení současného stavu provádění návarů armatur z duplexních ocelí.
2. Volba vhodné technologie navařování armatur.
3. Ověření navržené technologie navařování.
4. Návrh postupu navařování WPS a PQR v souladu s ASME CODE IX.

Seznam doporučené odborné literatury:

KUČERA, J. *Teorie svařování*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1991.
KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986
KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

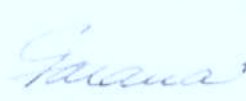
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



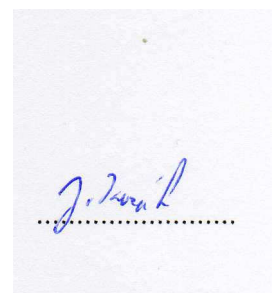

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Dále prohlašuji, že podklady poskytnuté podnikem MSA a.s. Dolní Benešov nebudou dále použity v žádné publikaci.

V Ostravě 23.5.2011

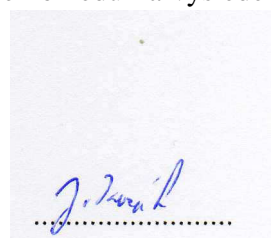
A photograph of a handwritten signature in blue ink, written over a horizontal dotted line on a white piece of paper. The signature is cursive and appears to read 'J. Zeman'.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011



Jindřich Kozák

Poštovní č.124

Bohuslavice 747 19

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOZÁK J. *Navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 63 s. Diplomová práce, vedoucí: Hlavatý, I.

Diplomová práce se zabývá navařováním těsnících ploch armatur z duplexních ocelí ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov. Na základě teoretické části práce byly navrženy, provedeny a posouzeny návary provedené metodou ručního navařování obalenou elektrodou (111), plasmovým navařováním (15) a navařováním plamenem (311). Výsledkem práce je návrh protokolů WPS a PQR dle ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July, 2010 pro navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí na základě vyhovujících výsledků zkoušek a zhodnocení práce jako takové.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

KOZÁK, J. *Surfacing sealing areas of armatures from duplex stainless steel*. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB Technical University of Ostrava, 2011, 63 p. Diploma thesis, head: Hlavatý, I.

The diploma thesis deals with sealing areas of armatures from duplex stainless steel in MSA a.s. Dolní Benešov. Weld deposits were proposed, performed and advised on the basis of the theoretical part of the thesis. The weld deposits were performed by manual metal arc welding (111), plasma arc hard surfacing (15) and gas welding (311). As a result of the diploma thesis there is a design of protocol WPS a PQR according to ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July, 2010 for sealing areas of armatures from duplex stainless steels, on the basis of successful results of tests and evaluation of thesis itself.

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení.....	8
1 Úvod.....	9
2 Posouzení současného stavu navařování duplexních ocelí.....	11
2.1 Navařování.....	11
2.1.1 Navařování oceli	12
2.1.2 Přídavné materiály vhodné pro navařování	13
2.2 Významné technologie navařování.....	14
2.2.1 Navařování plamenem	14
2.2.2 Navařování elektrickým obloukem.....	15
2.2.3 Navařování plazmou	17
2.2.4 Navařování laserem	19
2.2.5 Elektrovibrační navařování.....	20
2.3 Duplexní oceli.....	21
2.3.1 Chemické složení.....	25
2.3.2 Mechanické vlastnosti.....	25
2.3.3 Korozní odolnost duplexních ocelí	26
2.4 Svařitelnost duplexních ocelí.....	27
2.4.1 Vnesené teplo a tepelné zpracování.....	27
2.4.2 Příprava ploch pro navařování	29
2.4.3 Navařování součástí z duplexních ocelí.....	29
2.5 Navařování armatur	29
2.6 Výrobní charakteristika společnosti MSA a.s. Dolní Benešov.....	31
3 Volba vhodné technologie navařování	32
3.1 Duplexní ocel A 890 Gr.4A	32
3.2 Volba technologie navařování	32
3.2.1 Stellite 6.....	33
3.2.2 Inconel 625	34
3.3 Volba parametrů u jednotlivých technologií navařování.....	35
3.4 Rámcový technologický postup pro navařování vzorků.....	35
4 Provedení návrhů na zkušebních vzorcích.....	36
4.1 Varianta č. 1	37
4.2 Varianta č. 2	38
4.3 Varianta č. 3	39

4.4 Varianta č. 4	40
4.5 Varianta č. 5	41
5 Ověření a vyhodnocení technologií navařování	42
5.1 Zkouška kapilární	42
5.2 Zkouška ultrazvukem.....	44
5.3 Zkouška tvrdosti funkční plochy návaru	44
5.4 Posouzení makrostruktury	44
5.5 Posouzení mikrostruktury	47
5.6 Zkouška tvrdosti na průřezu vzorku	49
5.7 Zkouška mikrotvrdosti	50
5.8 Chemická analýza návaru	52
5.9 Ekonomické vyhodnocení.....	53
5.9.1 Vstupní hodnoty a příklady výpočtu.....	53
5.9.2 Celkové náklady na jednotlivé varianty.....	54
6 Návrh WPS a PQR.....	56
7 Zhodnocení výsledků navařování	57
8 Závěr	58
9 Seznam použitých pramenů	60
10 Seznam příloh	63

Seznam použitého značení

111	ruční obloukové svařování (navařování) obalenou elektrodou (SMAW)	
121	metoda svařování (navařování) automatem pod tavidlem (SAW)	
131	svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)	
135	svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG)	
15	svařování (navařování) plasmou (PAW)	
311	svařování (navařování) plamenem (OFW)	
52	svařování (navařování) laserem	
ANSI	americký národní institut pro standardy	
ASME	americké sdružení strojních inženýrů	
ASTM	americké sdružení pro zkoušky a materiály	
AWS	americké sdružení pro svařování	
ČSN	české technické normy	
DIN	německý institut pro průmyslovou normalizaci	
EN	evropské normy	
HB	tvrdost podle Brinella	
HRC	tvrdost podle Rockwella	
HV	tvrdost podle Vickerse	
M _s	martenzit start	
PA	poloha svařování (navařování) vodorovně shora	
PQR	protokol o kvalifikaci postupu svařování	
PRE	součinitel odolnosti proti důlkové korozi	
TOZ	teplem ovlivněná zóna	
WPS	specifikace postupu svařování	
ZM	základní materiál	
A	tažnost	[%]
I	elektrický proud	[A]
Q	tepelný příkon	[kJ.mm ⁻¹]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
U	elektrické napětí	[V]
v	rychlost svařování	[cm.min ⁻¹]

1 Úvod

Duplexní oceli patří mezi materiály, které nalézají uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, jako je například energetika, chemický, petrochemický průmysl apod. Potrubní systémy v těchto oblastech využívají komponenty z nejmodernějších materiálů, mezi které se duplexní oceli určitě řadí. Tyto materiály zajistí, že komponenty potrubních systémů mohou odolávat nejrůznějším okolním podmínkám, tlakům, teplotám a korozním prostředím.

Při výrobě armatur nejen z duplexních ocelí se využívá i technologie navařování, která zde slouží například pro tvorbu návarů těsnících ploch. Navařování společně se svařováním patří mezi jedny z hlavních výrobních technologií, které se v průmyslu uplatňují. Nejedná se pouze o těsnící plochy, kde navařování nachází své uplatnění, ale i o možnosti renovací použitých dílů či dokonce k jejich opravám, což snižuje náklady, které by jinak byly potřebné pro výrobu nebo nákup nových součástí.

Ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov vznikl požadavek na tvorbu návarů těsnících ploch armatur z duplexní oceli A 890 Gr. 4A (S31803/S32205 dle ASTM). Tato ocel vyniká svou houževnatostí a antikorozními vlastnostmi, což umožňuje její použití ve výše uvedených odvětvích, které patří do hlavního výrobního programu společnosti MSA a.s. Dolní Benešov. Její výrobky jsou pak vyváženy do řady oblastí, jako například Rusko, Saudská Arábie, Indie, Čína atd.

Diplomová práce se zabývá problematikou navařování těsnících ploch armatur z duplexní oceli A 890 Gr. 4A. Pro tento účel byly zvoleny dva typy návarů. Prvním z nich je přídavný materiál v podobě Stellite 6. Druhým použitým typem je pak Inconel 625. Návary byly provedeny několika technologiemi, kterými společnost MSA a.s. Dolní Benešov disponuje. Mezi technologie patří plazmové navařování (15), navařování plamenem (311) a ruční navařování obalenou elektrodou (111). Na tyto technologie je proto zaměřena tato práce, která by měla odpovědět na otázku: která technologie je pro navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí technologicky a ekonomicky nejvýhodnější? Po provedení těchto návarů následovalo provádění a vyhodnocení zkoušek a zvolení nejvýhodnější technologie.

Při navařování duplexních ocelí je nutné stejně jako u svařování dodržování několika nezbytných zásad, které jsou popsány v kapitole 2.4. Dodržování těchto zásad zajistí dosažení požadovaných korozních a kvalitativních vlastností, jako v případě základního materiálu.

Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení výsledků navařování při použití výše zmíněných technologií a navržení té, která je pro účely navařování těsnících ploch armatur nejvhodnější. Dalším cílem práce bylo vytvoření návrhu protokolu PQR dle normy ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July, 2010. Na základě PQR budou v podniku sestaveny technologické postupy, které budou sloužit pro potřeby MSA a.s. Dolní Benešov.

2 Posouzení současného stavu navařování duplexních ocelí

2.1 Navařování

Navařování je proces, při kterém dochází k natavování základního materiálu společně s přídavným materiálem za působení zvoleného zdroje tepla. Vytváří se tak homogenní kovová nebo slitinová vrstva. Mezi vhodné zdroje tepla se řadí plamen, elektrický oblouk, plazma, laser apod. [6, 7].

Jednou z výhod navařování je omezená hloubky závaru, což vede k omezení podílu základního materiálu v návarovém kovu. Dochází také ke snížení množství tepla vneseného do navařované součásti a tím se také omezí vznik pnutí a deformací. Tomuto účelu se přizpůsobuje i volba technologie a postupu navařování. Navařování lze použít například pro obnovu opotřeбенých součástí, kdy se volí přídavný materiál podobného složení jako je materiál základní. Dále lze navařování uplatnit při vytváření vrstvy se zvláštními vlastnostmi, mezi které patří například korozivzdornost, odolnost proti tepelnému namáhání, abrazivnímu opotřeбенí, adhezivnímu opotřeбенí, kavitaci či kombinaci různých faktorů [6, 7].

Výhody navařování [6]:

- navařená vrstva je kompaktní
- spojení se základním materiálem je metalické
- pevnost odpovídá minimálně pevnosti základního materiálu
- navařování lze automatizovat
- pomocí vhodných návarových materiálů a výkonných zdrojů lze docílit vysoké produktivity
- lze zhotovit vrstvy o vyšších tloušťkách
- různými kombinacemi prvků lze dosáhnout požadovaných vlastností návarů
- nízké náklady u ručních způsobů navařování

Nevýhody navařování [6]:

- tepelné ovlivnění základního materiálu
- v přechodu základní materiál-návar může dojít ke změně struktury
- speciální technologie navařování vyžadují dražší zařízení a vyšší nároky na operátory
- návarové vrstvy je většinou nutno opracovat pro dosažení požadované drsnosti a přesností rozměrů
- zhotovení tenkých vrstev je velice obtížné
- při navařování na ušlechtlejší materiály je nutný předehřev

Při navařování je nutné mít na zřeteli zejména teploty tavení základního i přídavného materiálu a jejich měrnou hmotnost. Pokud není rozdíl mezi teplotou tavení základního materiálu (zpravidla vyšší, než u přídavného materiálu) a teplotou tavení přídavného materiálu příliš vysoký, nebývá navařování problémem. Důležitou roli hraje při navařování také měrná hmotnost. Pokud je tato hmotnost základního materiálu nižší, než měrná hmotnost navařovaného materiálu, hrozí tzv. „vyplavení“ částic základního materiálu do návarové vrstvy. Dále je nutné zvolit vhodnou technologii navařování, což v sobě zahrnuje také přípravu povrchu a teplotní režimy. V neposlední řadě musíme brát v úvahu platné technické normy a předpisy pro navařování a požadavky odběratele [6].

2.1.1 Navařování oceli

Na nízkouhlíkové a nízkolegované oceli lze návary provádět prakticky bez problémů. Pro odlitky a nízkolegované ocele s vyšší pevností je nutné volit předehřev, jehož výše závisí na pevnosti, tvrdosti, hmotnosti a tvarové členitosti. Při určování vhodné teploty předehřevu nám můžou pomoci diagramy anizotermického rozpadu austenitu či výpočet ekvivalentu uhlíku dle vzorce [6]:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.1)$$

V případě nutnosti navařovat součást z uhlíkové oceli s vyšším obsahem uhlíku, která byla kalena, je nezbytné tuto součást předežhřát obvykle nad teplotu M_s . U navařování na povrch, jenž byl zpracován chemicko-tepelně (cementování, nitridování), je nutné, aby tato vrstva byla odstraněna. Toto platí i pro součásti galvanicky pokovené, opatřené nastříkanou vrstvou. Při navařování na oceli korozivzdorné či žáruvzdorné je použito speciálních postupů, které jsou stanoveny po konzultaci s odborníky nebo experimentálně [6, 7].

2.1.2 Přídavné materiály vhodné pro navařování

Přídavné materiály poskytují návary odpovídající svými vlastnostmi širokému spektru materiálu od uhlíkových a nízkolegovaných ocelí přes oceli s vysokým obsahem legujících prvků až po slitiny neželezných kovů. Podle tvaru a způsobu provedení lze přídavné materiály pro navařování rozdělit následovně [6]:

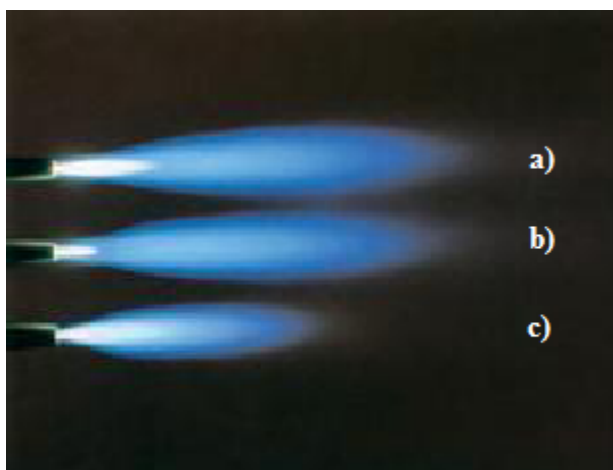
- a) Dráty – jsou vyráběny válcováním či tažením, mají kruhový průřez o průměrech 0,5 až 8 mm a mohou být povrchově upraveny.
- b) Obalované elektrody – používají se elektrody s plným drátem nebo také lité tyčinky, dále se také používá jádro z trubičkového plněného drátu.
- c) Tyčinky – vyrábějí se tažením (tažené dráty jsou povrchově upravovány), odléváním (ze slitin, které nelze zpracovat tažením) nebo také jako kompozity (jsou použity zrnité materiály, které jsou pak zality slitinovým kovem).
- d) Plněné elektrody – náplň obsahuje ionizační, dezoxidační a struskotvorné látky, nebo také legující prvky.
- e) Plněné pásy – vyrábějí se sbalením ocelové pásky.
- f) Pásy – vyrábí se v šířkách od 20 do 60 mm a tloušťkách 0,2 až 0,8 mm z kovů a slitin válcováním. Používají se při navařování pod tavidlem.
- g) Pasty – představují směsi dezoxidačních, ionizačních, struskotvorných složek a práškových kovů, slitin a feroslitin.

Mezi nejčastěji používané navařovací materiály patří obalené elektrody, které se uplatní zejména v opravárenství a renovacích. Mezi další převážně navařovací materiály patří lité tyčinky, nyní postupně nahrazovány trubičkovými dráty. Lité tyčinky jsou k dispozici také v litinovém provedení pro navařování součástí z šedé litiny. Pásky jsou používány zejména při navařování automatem pod tavidlem (121). Vyrábějí se většinou z austenitických stabilizovaných ocelí a také ze slitin s vysokým obsahem niklu. Velmi významné místo v oblasti navařování zauímají také prášky navařované převážně plazmou, hlavně při výrobě armatur, v automobilovém průmyslu a při renovacích [6].

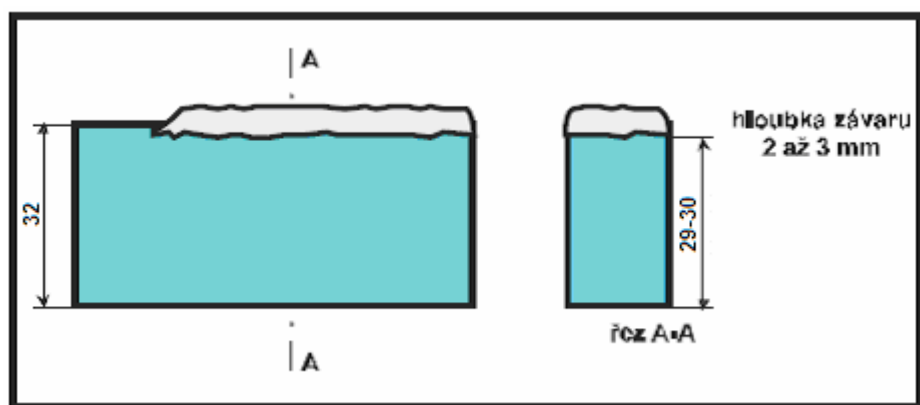
2.2 Významné technologie navařování

2.2.1 Navařování plamenem (311)

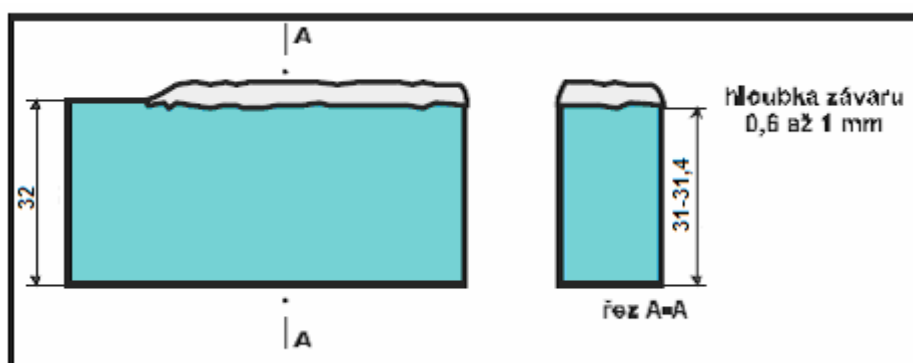
Ve většině případů se zde využívá hořlavé směsi acetylenu s kyslíkem. Při navařování na ocelový základ lze využít výhody acetylenu, redukčního plamene (přebytek acetylenu). Přebytek acetylenu při ohřevu základního ocelového materiálu nauhličí jeho povrchovou vrstvu, čímž se sníží tavící teplota a snadněji se utavuje přídatný materiál. Dochází také k minimalizaci podílu základního materiálu v návarovém kovu. Na obrázku 2.1 je zobrazen plamen dle poměru $C_2H_2:O_2$ [6].



Obr. 2.1 Jednotlivé druhy plamenů [6]
(a – redukční, b – neutrální, c – oxidační)



Obr. 2.2 Návar neutrálním plamenem [6]



Obr. 2.3 Návar redukčním plamenem [6]

Mezi hlavní charakteristiky navařování plamenem patří návar bez propalu, plošné tepelné zatížení. To vede k relativně nižšímu napětí v návaru. Dále se doporučuje vysoký přehřev, který pak brání praskání návaru [6].

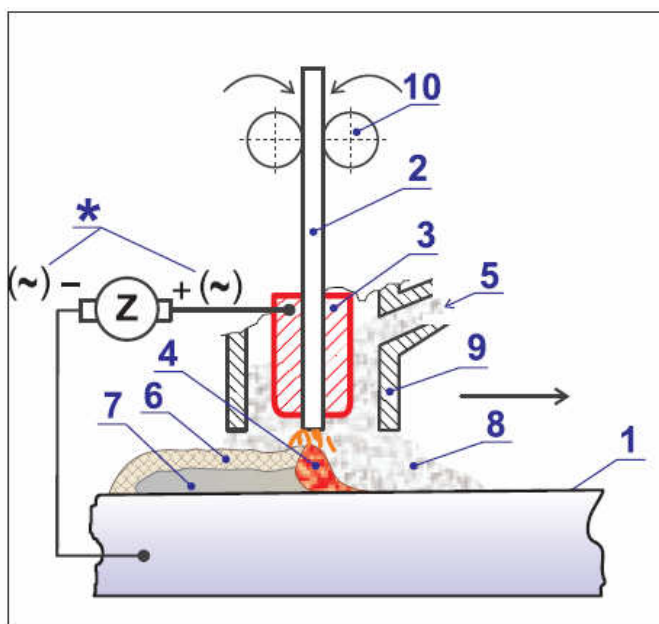
2.2.2 Navařování elektrickým obloukem

a) Ruční navařování obalenou elektrodou (111)

Pro účely návarů se většinou používají elektrody s bazickým obalem. Obal těchto elektrod obsahuje, kromě ochranných složek, také prvky legující návarový kov. V určitých případech je možné použít i elektrod s kyselým či rutilovým obalem. Velký vliv na propal legujících prvků má tzv. studená struska. Nedoporučuje se navařovat nitridové a zakalené povrchy. Ty by měly být podrobeny vyžhání [6].

b) Navařování automatem pod tavidlem (121)

Návar na základním materiálu vzniká odtavováním průběžně podávaného přídavného materiálu, který může být ve formě drátu, plněné elektrody či pásky. Tento návar je chráněn, popřípadě i legován vrstvou tavidla, která ho zároveň formuje [6].



Obr. 2.4 Schéma metody [6]

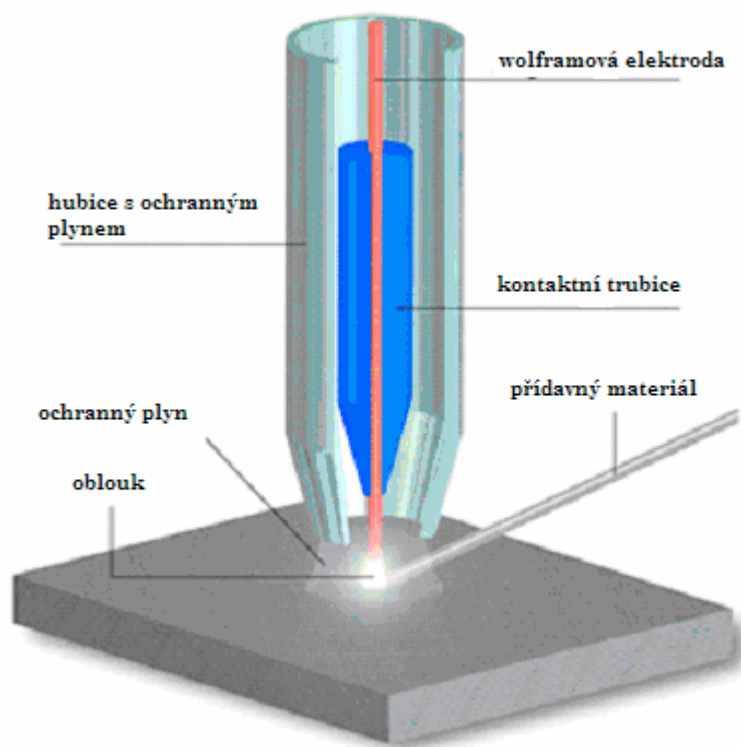
(1 – základní materiál, 2 – přídavný materiál, 3 – kontaktní trubice,
4 – svarová lázeň, 5 – přívod tavidla, 6 – struska, 7 – návar, 8 – tavidlo, 9 – hubice pro
přívod tavidla, 10 – posuvné válce přivádějící přídavný materiál)

Způsoby navařování pod tavidlem [6]:

- navařování jedním drátem
- navařování dvěma dráty (umístěnými za sebou nebo vedle sebe)
- navařování dvěma dráty, z nichž svislý je napojen na + pól a přídatný je spolu se základním materiálem napojen na – pól stejnosměrného zdroje proudu
- navařování páskou, které je možné provádět jak pod tavidly tavenými, tak pod keramickými
- navařování dvěma páskami

c) Obloukové navařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141)

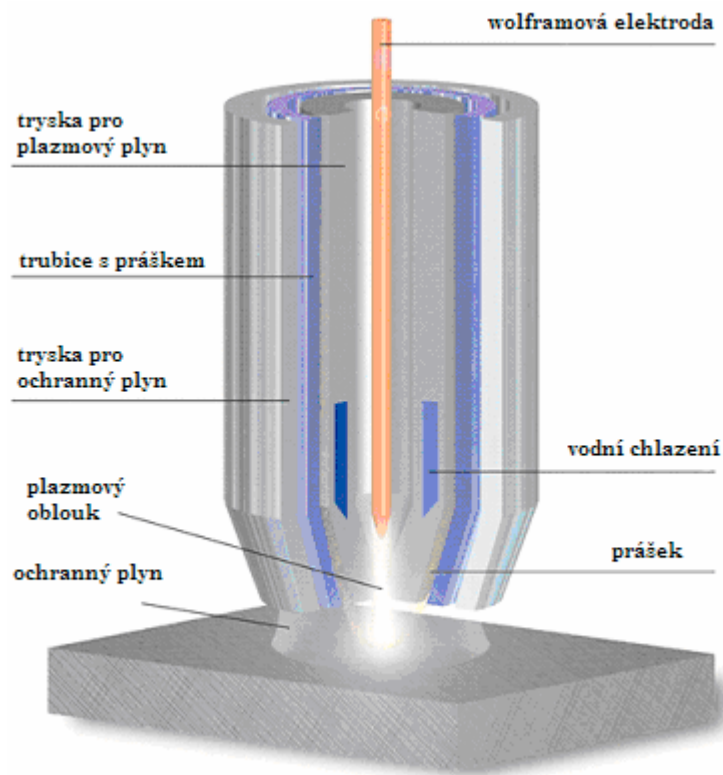
Mezi výhody této technologie patří jednoduchá manipulace, dobrá ovladatelnost elektrického oblouku, možnost mechanizace navařování. U zdrojů s pulzním režimem můžeme regulovat vnesené teplo a průběh hoření oblouku pomocí modulace elektrického oblouku. Toto je velkou výhodou zejména u renovací [6, 11, 20].



Obr. 2.5 Schéma metody [11]

2.2.3 Navařování plazmou (15)

Plazmový oblouk se vyznačuje vysokou energetickou hodnotou a teplotou až 25 000°C. Rychlost ohřevu je tedy velmi vysoká, na druhou stranu je zde velice malá tepelně ovlivněná oblast a nízká úroveň deformací. Přídavné materiály jsou nejčastěji na bázi kobaltu, niklu nebo také vysokolegovaných ocelí s tvrdostí od 250 HB [6, 9, 12].



Obr. 2.6 Schéma metody [12]

Pokud dochází k hoření tohoto plazmového oblouku jen mezi wolframovou elektrodou a chlazenou anodou, jedná se o hořák s nepřeneseným obloukem. Jestliže se však kladný pól přenese z trysky na vodivý materiál, jde o přenesený plazmový oblouk. Pro potřeby navařování se používá plazma s přeneseným obloukem, jež se využívá hlavně při navařování těsnících ploch průmyslových armatur, funkčních částí sklářských forem, dopravních šneků apod. [6, 9].



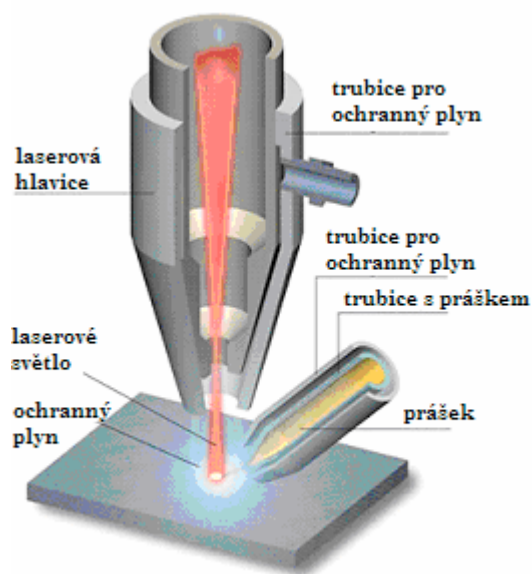
Obr. 2.7 Malé sedlo navařované plazmou [6]

Výhody navařování plazmou [6, 9]:

- návary bez pórů, bublin či ředin
- minimální propal legujících prvků
- vysoká výtěžnost práškových přídavných materiálů
- široký sortiment přídavných materiálů
- možnost automatizace
- bezpečnost práce
- snížení doby navařování
- poměrně úzká oblast tavení a minimální ovlivnění základního materiálu

2.2.4 Navařování laserem (52)

Navařování laserem patří mezi speciální technologie, jenž vyžadují vysoce kvalifikovaný personál. Nalézá využití v těch společnostech, kde je to ekonomicky a technicky výhodné. Laser přeměňuje dodávanou energii na energii elektromagnetického záření. Dochází k tavení práškového přídavného materiálu neseného na povrch inertním plynem. Nejčastěji používané přídavné materiály jsou na bázi železných a kobaltových slitin s tvrdostí 60 HRC, niklových slitin s tvrdostí 64 HRC, karbidů wolframu, niobu, molybdenu a také titanu s tvrdostmi od 1600 po 3200 HV [6, 10].

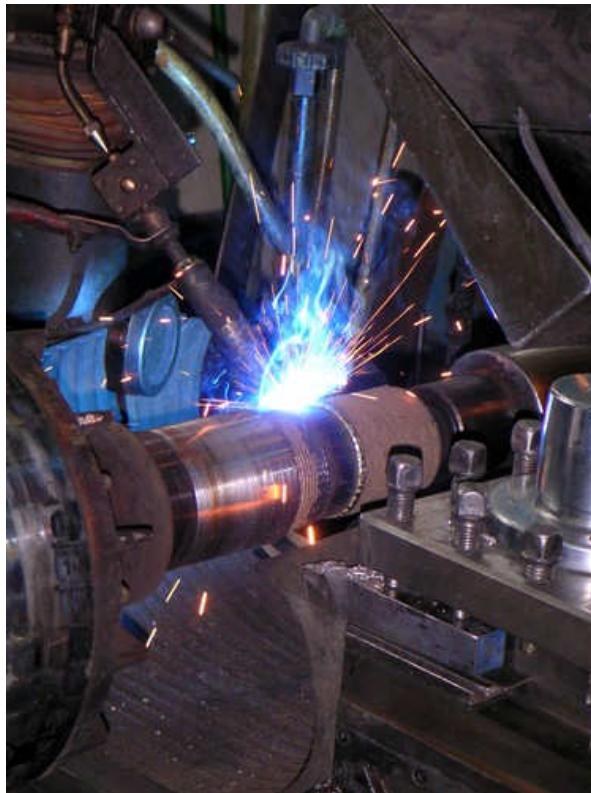


Obr. 2.8 Schéma metody [13]

Mezi hlavní charakteristiky navařování laserem patří vysoké navařovací rychlosti, minimální deformace navařovaných dílů a úzká tepelně ovlivněná oblast. V dnešní době se pro účely svařování a navařování používají tři typy průmyslových laserů, kde patří plynové CO₂ lasery, pevnolátkové lasery a polovodičové lasery [6, 9].

2.2.5 Elektrovibrační navařování

Metoda založená na principu pohybu drátu, podobně jako metody 131/135. Proces probíhá tak, že přídatný materiál vykonává kmitavý pohyb k navařovanému materiálu v ochranném prostředí plynu či kapaliny. Při tom dochází k neustálému zapalování a zhasínání elektrického oblouku. Nejvýhodnější je navařování v ochranném prostředí plynu (CO₂), kdy na rozdíl od kapalného prostředí, dochází k menšímu výskytu pórů a studených spojů. Metoda nachází uplatnění v oblastech, kde by nemělo dojít k velkému tepelnému ovlivnění základního materiálu. Elektrovibrační navařování je vhodné zejména u rotačních součástí [21, 22].



Obr. 2.9 Proces navařování [21]

2.3 Duplexní oceli

Tyto oceli patří do skupiny takzvaných vysokolegovaných ocelí, které obsahují více než 10 hm. % celkového obsahu legur. Mezi důvody jejich výroby patří zejména zlepšení korozních, žáruvzdorných, žárovevných vlastností apod. Mezi korozivzdorné oceli řadíme ty, které jsou schopné pasivace a odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Oceli, jenž odolávají oxidaci a chemické korozi v plynech při teplotách nad 600°C, nazýváme žáruvzdorné. Dále existují tzv. žárovevné oceli, které se vyznačují vysokými hodnotami meze pevnosti při tečení [1, 4, 14].

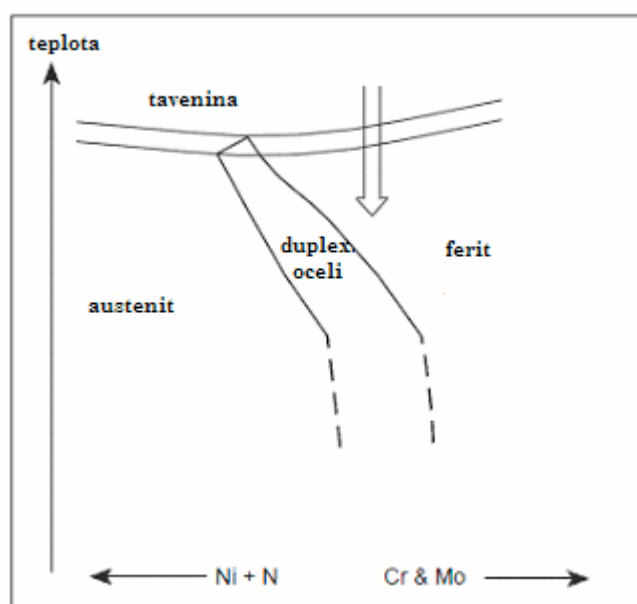
Rozdělení vysokolegovaných ocelí dle mikrostruktury a obsahu prvků [4]:

- a) Feritické chromové oceli
- b) Martenzitické chromové oceli
- c) Austenitické Cr-Ni nebo Cr-Ni-Mo oceli
- d) Austeniticko-feritické (duplexní) Cr-Ni nebo Cr-Ni-Mo oceli

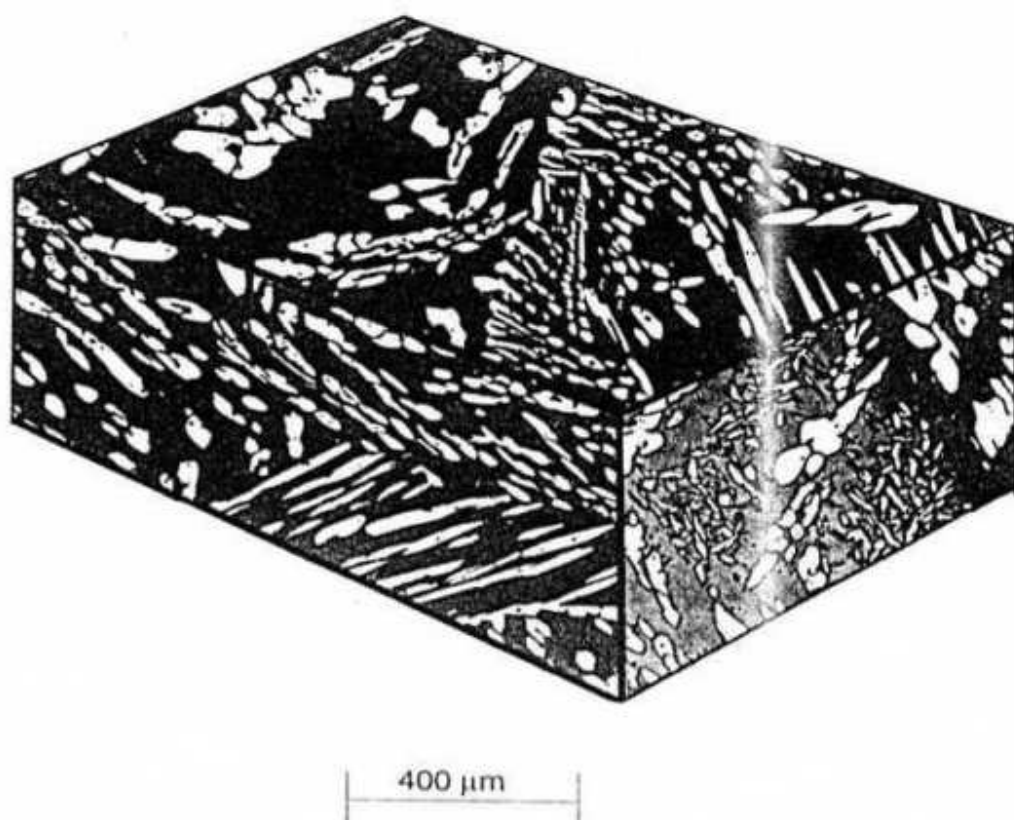
Duplexní oceli v sobě kombinují výhodné vlastnosti ocelí feritických a austenitických, dále také perlitických a martenzitických. Stále častěji tak tvoří k těmto ocelím vhodnou alternativu. Množství austenitu je silně závislé na chemickém složení a rychlosti ochlazování. Díky vysokému obsahu chromu, dusíku a často také molybdenu jsou velice odolné proti lokální i plošné korozi. Mikrostruktura duplexních ocelí také přispívá k vysoké pevnosti a odolnosti proti koroznímu praskání. Na druhou stranu jsou náchylnější k precipitaci sigma fáze, nitridů a karbidů, což způsobuje křehnutí a snižuje korozní odolnost. Zmíněná sigma fáze vzniká v teplotním rozsahu 600-950°C. Tyto oceli by se, kvůli riziku křehnutí, neměly užívat při teplotách okolo 250-325°C. V tabulce 2.1 je uvedeno doporučené tepelné zpracování. Na obrázku 2.10 je schématicky znázorněn mechanismus tuhnutí duplexních ocelí [1, 2, 14, 15].

Tab. 2.1 Doporučené tepelné zpracování [2]

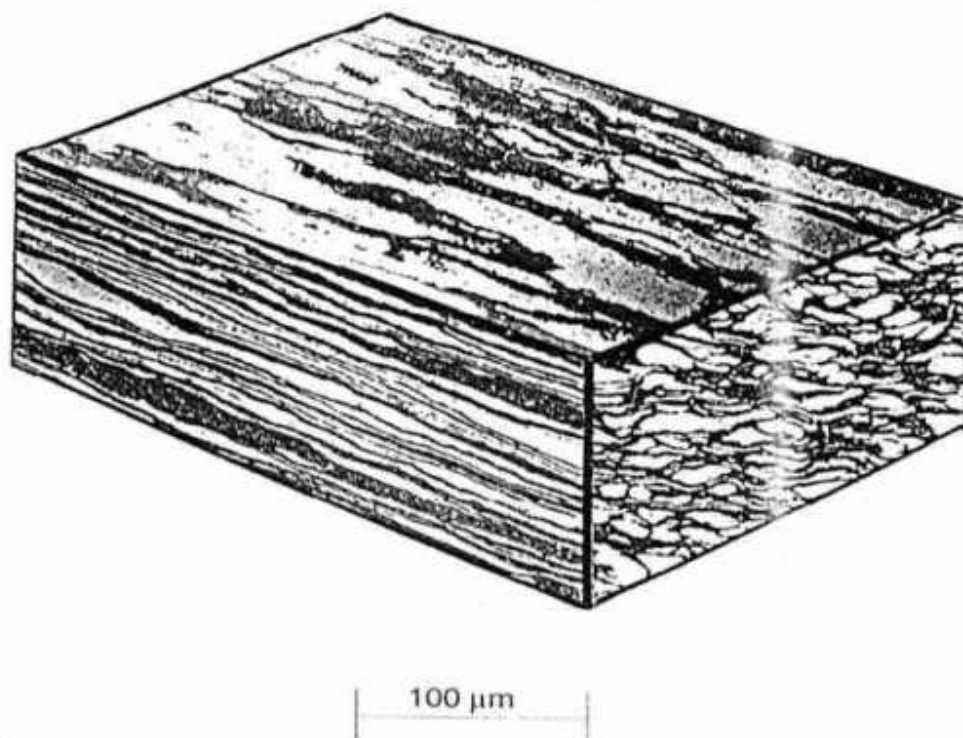
Označení oceli (dle ASTM)	S32304	S31803/S32205	S32750
Tváření za tepla [°C]	900-1100	950-1050	1025-1200
Rozpouštěcí žíhání [°C]	950-1050	1020-1100	1040-1120
Žíhání na snížení pnutí [°C]	950-1050	1020-1100	1040-1120



Obr. 2.10 Schématický diagram tuhnutí duplexní oceli [16]



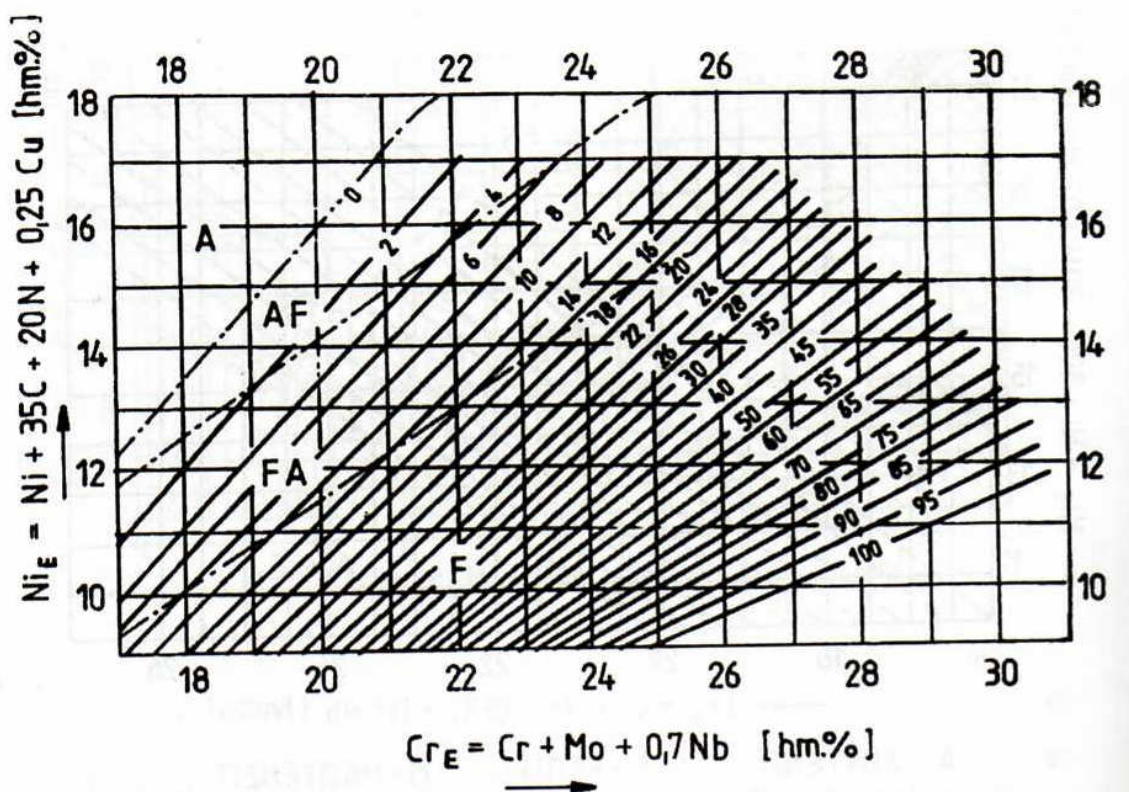
Obr. 2.11 Struktura duplexní oceli v litém stavu [1]



Obr. 2.12 Struktura duplexní oceli válcované za tepla [1]

Duplexní oceli tuhnou výhradně ve feritické struktuře. Pak se podrobí fázové transformaci, při které vzniká primární a sekundární austenit na hranicích zrn feritu. Obsah austenitu silně závisí na složení a ochlazovací rychlosti. Při výrobě plechů, trubek a podobných výrobků, může být použito takové tepelné zpracování, po kterém je dosaženo poměru austenitu a feritu 50:50. To bohužel neplatí u svařování, kdy dochází přece jen k rychlému ochlazení, při kterém není dostatek času pro vznik austenitu. Pro svařování se tedy používají takové přídavné materiály, které obsahují vysoký podíl niklu, aby se podpořil vznik austenitu [1, 2, 14].

Vzhledem k tomu, že pro odhad mikrostruktury Cr-Ni ocelí, s vyšším podílem feritu ve struktuře, nelze použít Schaefflerův ani De Langův diagram, byl pro tento účel vytvořen diagram nový. Tento diagram se nazývá WRC – 1992 (obr. 2.13) a slouží pro odhady obsahu feritu v ocelích s jeho vyšším podílem, jako jsou například duplexní oceli. Tyto diagramy lze použít pro odhady obsahu feritu a austenitu jak v základním materiálu, tak i ve svařovém kovu [4].



Obr. 2.13 Diagram WRC – 1992 [4]

Charakteristické vlastnosti duplexních ocelí [1, 4, 5, 14]:

- velice dobrá odolnost proti plošné korozi, důlkové korozi a koroznímu praskání
- vysoká pevnost
- vysoká odolnost proti opotřebení a únavě
- vysoká tepelná vodivost
- nízká tepelná roztažnost
- dobrá svařitelnost

Použití [2, 14]:

- papírenský průmysl
- nádrže a potrubní systémy v chemickém průmyslu
- protipožární zařízení na plošinách
- tlakové nádoby
- tepelné výměníky
- hřídele, rotory a lopatková kola

2.3.1 Chemické složení

V chemickém složení lze sledovat dva prvky, které svým obsahem výrazně převažují, a to chrom a nikl. Jejich vliv je následující [1, 5, 16]:

Tab. 2.2 Tabulka chemických složení vybraných ocelí % [16]

Označení (dle ASTM)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
S32304	0.03	0.5	1.4	<0.04	<0.04	23	4	-	0.1
S32205	0.03	<1.0	<1.0	<0.035	<0.02	22	6.5	3.1	0.18
S32750	0.03	<0.8	<1.2	<0.035	<0.02	25	7	4	0.3

Chrom – feritotvorný, zajišťující odolnost proti korozi (zejména v oxidických prostředích), na vzduchu se kov jeho vlivem pokrývá tenkou vrstvičkou oxidu, která kov chrání před korozí [3, 23].

Nikl – austenitotvorný prvek, který se vyznačuje vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. Při normálních, ale i nízkých teplotách, stabilizuje austenit a zvyšuje korozní odolnost v redukčních sloučeninách [3, 23].

2.3.2 Mechanické vlastnosti

Pevnost austeniticko-feritických ocelí je vyšší než u ocelí austenitických a zvyšuje se s rostoucím podílem feritu. Příznivý vliv na mechanické vlastnosti má zejména dusík. Dále tyto oceli dosahují uspokojivé vrubové houževnatosti při obsahu 40-50 % feritu. Je vhodná pro výrobu odlitků a jejich případné navařování [1, 14, 16].

Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [16]

Označení (dle ASTM)	R _{p0.2} [Mpa]	R _m [Mpa]	A [%]	Tvrđost HV10
S32304	400	600-820	25	230
S32205	450	680-880	25	260
S32750	550	800-1000	25	290

2.3.3 Korozní odolnost duplexních ocelí

Díky vysokému obsahu chromu, duplexní oceli mohou nabídnout vysokou odolnost proti plošné korozi v mnoha korozních prostředích. Plošná koroze je charakterizována plošným působením korozního prostředí na povrch oceli. Korozní odolnost oceli je považována za dobrou, pokud rychlost koroze nepřesáhne 0,1mm/rok. Odolnost proti důlkové korozi úzce souvisí s obsahem chromu, molybdenu a dusíku. Tuto souvislost definuje vztah [1, 2, 14, 15, 16]:

$$PRE = Cr + 3,3Mo + 16 N [-] \quad (2.2)$$

Další oblastí korozní odolnosti, ve které duplexní oceli vynikají nad austenitickými, je odolnost proti koroznímu praskání. Tato odolnost se měří pomocí různých metod a výsledek je závislý na typu metody a testovacím prostředí. Kombinace vysoké pevnosti a odolnosti proti korozi vede k tomu, že duplexní oceli velice dobře odolávají únavové korozi. Dále díky nízkému obsahu uhlíku, charakteristické mikrostruktuře a schopnosti pasivace, jsou tyto oceli odolné proti mezikrystalové a galvanické korozi [1, 14, 15, 16].

Obecně lze konstatovat, že duplexní oceli nejsou náchylné k vodíkovému praskání, avšak může nastat situace, kdy současně působí tahové namáhání, v oceli je přítomna fáze citlivá na vodík (např. ferit) v přítomnosti vodíku. V takové situaci může dojít k vodíkovému praskání. Se zvyšujícím se obsahem feritu nad 50% tato možnost stále stoupá. Tomu může napomoci vlhkost obsažená v obalu elektrody (v případě ručního svařování obalenou elektrodou) [1, 14, 15, 16].

2.4 Svařitelnost duplexních ocelí

Obloukové svařování doprovází vždy tepelné ovlivnění oblastí poblíž sváru či návaru. Tepelně ovlivněná zóna je zahřátá na takovou teplotu, při které je struktura materiálu téměř plně feritická. Při rychlém ochlazování vznikají nitridy chromu. Omezené množství nitridů chromu nemá velký vliv na svařitelnost pokud se nenacházejí v zrnech poblíž povrchu materiálu. V tom případě dochází k degradaci korozních vlastností. Obdobný vliv na degradaci korozních vlastností má také vznik sekundárního austenitu, který vzniká v rozmezí teplot 800-950°C a objevuje se v horních oblastech kořenové vrstvy, kde jsou příznivé podmínky pro jeho vznik. Duplexní oceli nejsou náchylné na teplé trhliny [2, 4, 15, 16].

Mezi nejčastěji používané metody svařování a navařování patří ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, svařování plasmou, které je mechanizované a často používané pro svařování potrubních systémů, navařování těsnících ploch armatur atd. U tohoto druhu svařování popřípadě navařování, se doporučuje použití dusíku do ochranného plynu. U ručního navařování obalenou elektrodou je důležité správně ukončit navařování (vyplnit koncový kráter), kdy je oblouk zhasnut několika kruhovitými pohyby v návarové lázni. Při příliš rychlém provedení tohoto úkonu by mohlo dojít ke vzniku kráterů a vměstků [2, 4, 15, 16].

2.4.1 Vnesené teplo a tepelné zpracování

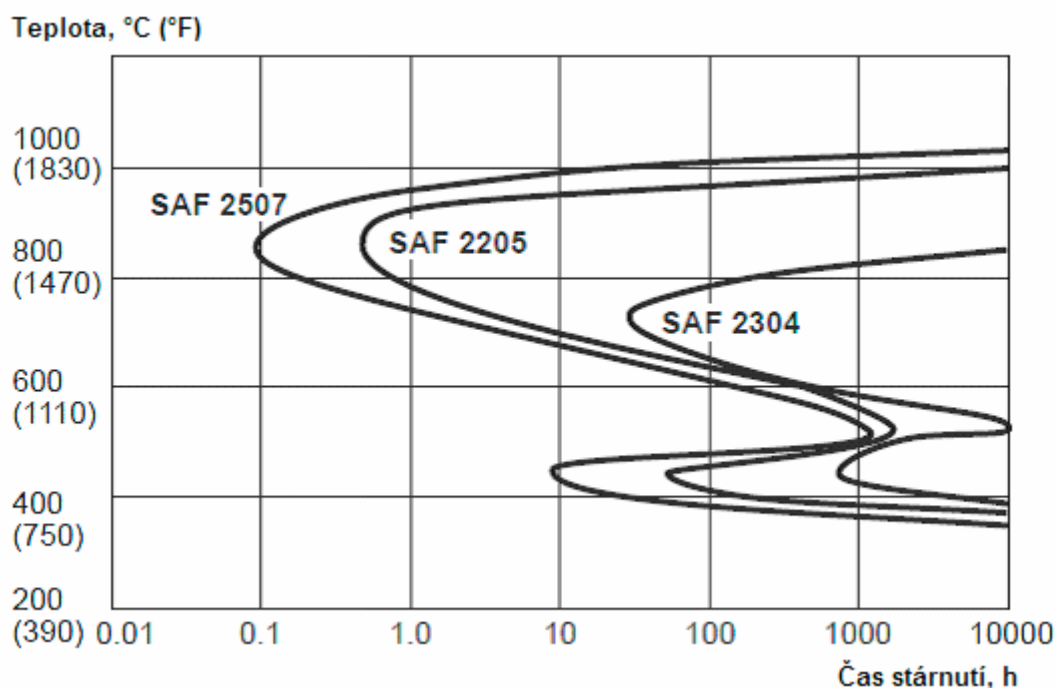
Navařování se provádí při teplotě okolí, při nižších teplotách se může volit přehřev maximálně 150°C u odlitků. Dále je nutné sledovat a pravidelně měřit mezihousenkovou teplotu, která by neměla překročit rovněž 150°C. U duplexních ocelí není nutné tepelné zpracování s výjimkou určitých konstrukcí, kde je vhodné užít žíhání na snížení vnitřního pnutí [1, 2, 4].

Vnesené teplo se musí volit v závislosti na tloušťce materiálu v rozmezí 0,5-2,5 kJ.mm⁻¹. V případě příliš vysokého vneseného tepla dochází k precipitaci intermetalických fází, k čemuž je náchylný hlavně ferit. Na druhou stranu duplexní oceli by neměly být svařovány s příliš nízkým tepelným výkonem, jelikož pak může dojít k příliš rychlému ochlazování a zvýšení obsahu feritu. To by mělo za následek zhoršení mechanických a korozních vlastností [1, 2, 4].

Vzorec pro výpočet vneseného tepla [3]:

$$Q = \frac{U \times I}{v \times 1000} \quad [\text{kJ.mm}^{-1}] \quad (2.3)$$

Pokud je nutné tepelné zpracování (například u navařování plamenem), mělo by probíhat pod přísnou kontrolou časů a teplot kvalifikovaným personálem. Tepelné zpracování by mělo probíhat při teplotách uvedených v tabulce 2.1. Při manipulaci a ustavování výrobků z duplexních ocelí před tepelným zpracováním se musí brát ohled také na to, že při vysokých teplotách se u těchto ocelí snižují mechanické vlastnosti [2].



Obr. 2.14 Zkřehnutí ocelí následující po procesu stárnutí [16]
(po levé straně křivek je hodnota nárazová práce jednotlivých ocelí vyšší než 27J)

2.4.2 Příprava ploch pro navařování

Navařování součástí z duplexních ocelí vyžaduje pečlivou přípravu navařovaných ploch. Po frézování či soustružení těchto a přilehlých ploch, následuje jejich důkladné očištění od všech druhů nečistot, olejů, zbytků tuků atd. Dále je nutné odstranění všech oxidů, případných zbytků barvy a to aspoň do vzdálenosti 50 mm od navařované plochy. Po navařování následuje důkladné očištění, což přispěje k vyhovující korozivzdornosti. Čištění lze provést mechanicky broušením, leštěním či chemicky například mořením. Pro očištění musí být použito náradí, které je vhodné pro nerezový typ oceli [2].

2.4.3 Navařování součástí z duplexních ocelí

Během navařování mohou tyto oceli trpět náchylností na křehnutí, způsobenou vznikem karbidů a nitridů, případně intermetalických fází. Precipitace sekundárních fází může vést ke snížení korozní odolnosti a také ke snížení houževnatosti. Nevýhoda duplexních ocelí tkví hlavně ve snadné a rychlé tvorbě křehkých fází během procesu navařování. Tento jev nastává zejména při teplotách 300-1000°C. Tomuto jevu se nelze zcela vyhnout, avšak je možné jej omezit volbou vhodných navařovacích parametrů [24].

2.5 Navařování armatur

Při výrobě armatur, mezi které patří klíny šoupátkových uzávěrů, sedla, návary sedel v tělesech, sedla a kuželky ventilů, sedla a plochy deskových uzávěrů, zpětné a škrťací klapky apod. se navařování uplatňuje zejména prostřednictvím návarů těsnících ploch. Navařované těsnící plochy by neměly obsahovat trhliny a vady větší než 0,2 mm, dále nedovařené hrany a tloušťka návaru by neměla klesnout pod požadovanou úroveň. [6].



Obr. 2.15 Klín šoupátka [9]



Obr. 2.16 Sedla šoupátek [9]



Obr. 2.17 Sedlo ventilu [9]

Převažují především mechanizované technologie navařování, ale přesto se užívá i navařování ruční. Například při navařování větších klínů a sedel šoupátek, které budou používány při vysokých parametrech (teplota, tlak atd.). Zde je pro potřeby navařování použito vysoce legovaných slitin jako například slitiny typu Co, Cr a W – stellity. Specifickou technologií pro armatury vysokých parametrů je navařování plazmou. Navařování dráty, plněnými elektrodami (jak v ochranných plynech, tak pod tavidlem) se užívá pro těsnicí plochy armatur navržených pro nižší nebo střední parametry. Zde se využívají materiály s dobrou odolností proti korozi, u kterých je stanoven podíl chromu, uhlíku a případně také niklu, molybdenu a jiných [6, 9].

2.6 Výrobní charakteristika společnosti MSA a.s. Dolní Benešov

Společnost MSA a.s. Dolní Benešov je důležitý světový výrobce a vývozce průmyslových armatur. Hlavní roli v produkci hrají zejména kulové kohouty, šoupátka, klapky a ventily vyráběné hlavně dle norem ČSN, ANSI, DIN a dalších. Dále zde patří také speciální armatury určené zejména pro aplikace v jaderné energetice. Technické a technologické zázemí společnosti MSA a.s. umožňuje produkovat jedny z rozměrově a tlakově největších armatur v nejrůznějších materiálových provedeních [25].

Odvětví, do kterých jsou armatury určené [25]:

- přeprava a zpracování ropy
- přeprava, distribuce a zpracování plynu
- klasická i jaderná energetika, teplárenství a tepelné sítě
- vodárenství

3 Volba vhodné technologie navařování

3.1 Duplexní ocel A 890 Gr.4A

Počátky jejího vývoje sahají až do 70. let 20. století. Jedná se o ocel s vyváženou austeniticko-feritickou strukturou, která vykazuje vysokou korozní odolnost především v neutrálních a středně kyselých prostředích. Odolává zejména bodové korozi, koroznímu praskání za napětí a vibrační korozi. Velice vhodná pro použití v chemickém i petrochemickém průmyslu apod. Tato ocel je značena 1.4462 dle EN a S31803/S32205 dle ASTM [1, 16].

Tab. 3.1 Chemické složení v hm. % (příloha 1)

C	Si	Mn	P	S
0.03	0.68	0.94	0.021	0.004
Cr	Ni	Mo	N	Cu
22.22	6.11	3.14	0.12	0.15

Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti (příloha 1)

R _{p0.2} [MPa]	415
R _m [MPa]	620
Tažnost A [%]	25
Nárazová práce při 20 °C [J]	261.7

3.2 Volba technologie navařování

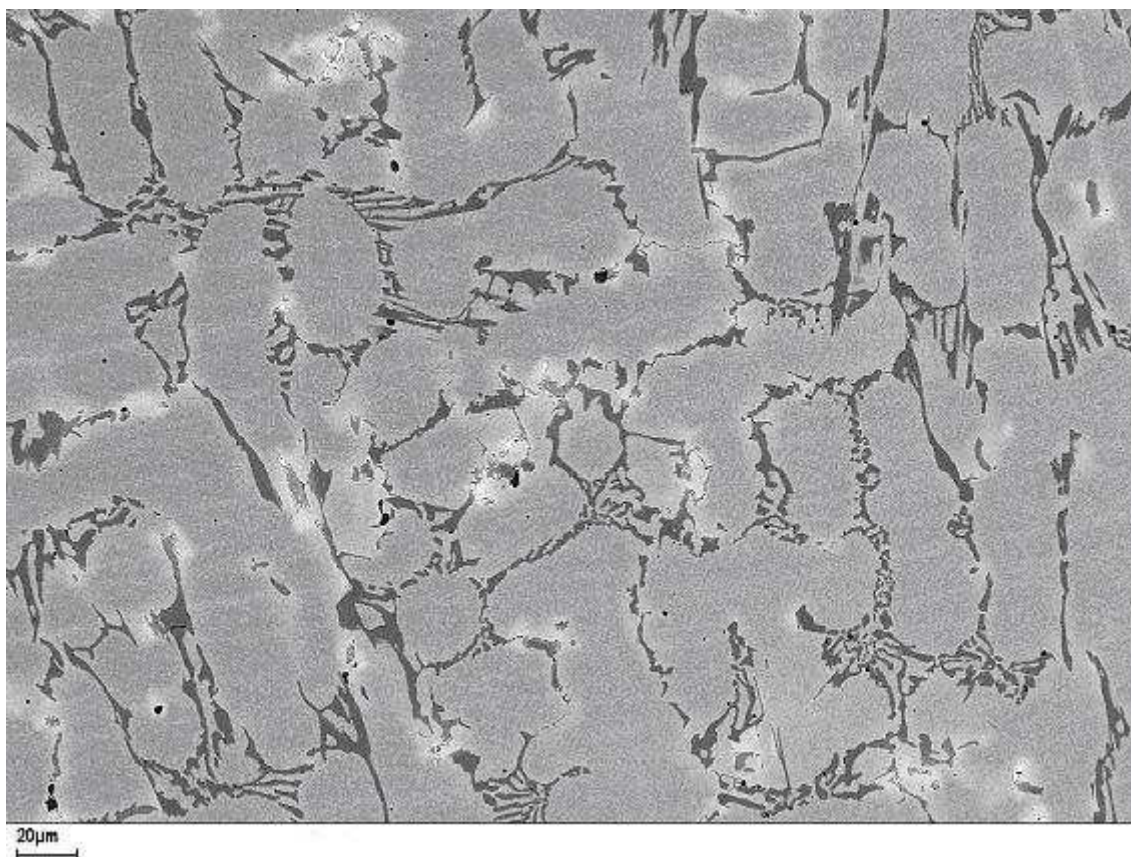
Společnost MSA a.s. Dolní Benešov má k dispozici technologii navařování plazmou (15), dále ruční navařování obalenou elektrodou (111) a navařování plamenem (311). Tyto technologie byly použity pro navaření 5 vzorků, jejichž porovnání a vyhodnocení pak určí technologii, která bude dále doporučena pro navařování armatur z duplexních ocelí. Jako přídatný materiál byl u těchto technologií použit Stellite 6 a Inconel 625.

3.2.1 Stellit 6

Komerčním názvem Stellite 6 výrobce Deloro Stellite Group nebo Celsit V výrobce Böhler Welding Group (E CrCo-A/R CrCo-A dle AWS 5.13). Jde o slitinu na základě Co, která má vysokou odolnost proti chemickému i mechanickému opotřebení a vysokou tvrdost. Chemické složení uvádí tabulka č. 3.2. Tento návarový materiál byl použit ve formě drátu o průměru 6 mm pro technologii navařování plamenem (311), prášku pro plazmové navařování (15) a elektrody o průměru 4 mm pro technologii ručního navařování obalenou elektrodou (111). Na obrázku č. 3.1 je vidět licí struktura návaru [19, 28].

Tab. 3.2 Chemické složení v hm. % [19]

C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Co	Fe
1.2	1.1	1	28	<3	4.5	základ	<3



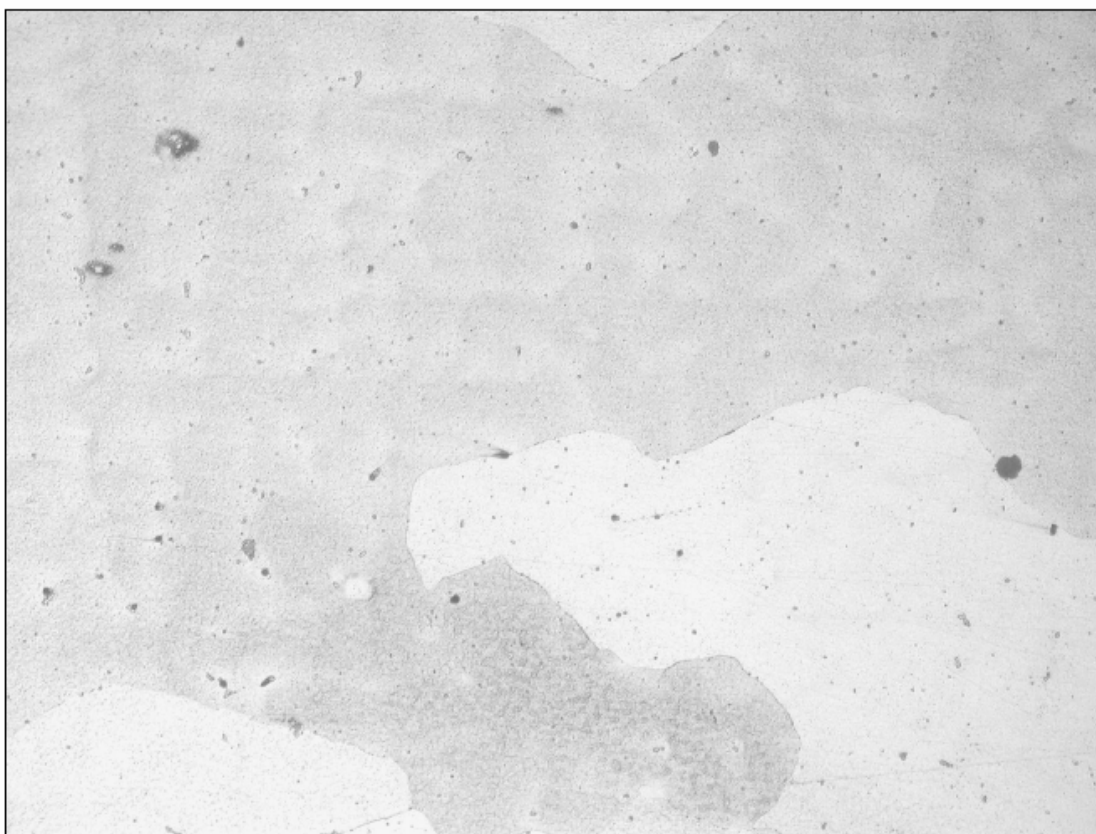
Obr. 3.1 Licí mikrostruktura [26]

3.2.2 Inconel 625

Tento materiál pochází od výrobce Böhler Welding Group, kde je značen jako Nibas 625 (ENiCrMo-3 dle AWS A5.11-05). Mezi výhody patří výborné mechanické vlastnosti a možnost použití například u tlakových nádob v širokém rozsahu teplot od -196°C do 550°C. Dále se vyznačuje výbornou odolností proti důlkové korozi, trhlinám a koroznímu praskání. Pro metodu 111 byla použita elektroda o průměru 3,2 mm a pro metodu 15 pak drát o průměru 1,2 mm [8, 17].

Tab. 3.3 Chemické složení v hm. % [17]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	Co	Fe
0.025	0.4	0.7	22.0	>60.0	9.0	<0.4	3.3	<0.05	0.5



3.2 Lící mikrostruktura (200x) [18]

3.3 Volba parametrů u jednotlivých technologií navařování

Při volbě parametrů navařování u jednotlivých technologií bylo přihlédnuto ke svařitelnosti duplexních ocelí. V případě metody 111 probíhala volba parametrů na základě doporučení výrobce. Pro metodu 15 byly parametry určeny opět za pomoci doporučených hodnot výrobce, ale také na základě protokolů WPS pro tuto technologii ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov. Podobný postup byl zvolen i u poslední metody 311, kdy se opět vycházelo z dřívějších WPS této společnosti. Zvolené parametry pro jednotlivé technologie a přídavné materiály jsou uváděny v kapitole 4. Všechny vzorky byly navařovány v poloze PA (1G dle ASME IX).

3.4 Rámcový technologický postup pro navařování vzorků

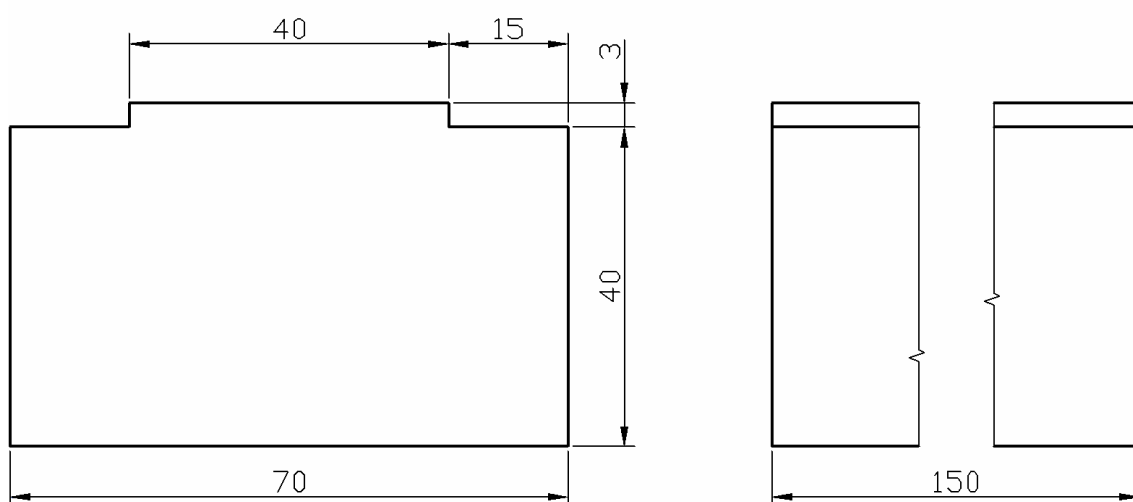
1. Ustavení popřípadě upnutí vzorku do polohy pro navařování.
2. Očištění a odmaštění navařovaných ploch před navařováním.
3. Navařování první housenky či vrstvy na vzorek. Po navaření každé vrstvy očistit pomocí vhodného nářadí pro duplexní oceli. Při navařování musí být kontrolována mezihousenková teplota. Během navařování zapisovat do protokolu navařovací parametry.
4. Po navařování očistit od strusky a zbytků jiných nečistot.

4 Provedení návarů na zkušebních vzorcích

Návary byly provedeny na vzorcích z duplexní oceli o rozměrech 43x70x150 mm. Na obrázku č. 4.1 je vidět vzorek připravený pro navařování plasmou (15).



Obr. 4.1 Vzorek před navařováním



Obr. 4.2 Rozměry vzorku před navařováním (1:1)

4.1 Varianta č. 1

Tab. 4.1 Parametry navařování

Metoda:	311
Přídavný materiál:	Stellit 6 – drát o průměru 6 mm
Druh plamene:	redukční
Počet vrstev:	2 vrstvy
Předehřev:	min. 500 °C
Dohřev:	700 °C.2h ⁻¹ , chlazení max. 80 °C.h ⁻¹
Rychlost navařování:	4,3 cm.min ⁻¹



Obr. 4.3 Po navařování metodou 311

4.2 Varianta č. 2

Tab. 4.2 Parametry navařování

Metoda:	15
Přídavný materiál:	Stellit 6 – prášek
Ochranný plyn:	Argon - 12 l.min ⁻¹
Plasmový plyn:	Argon - 2 l.min ⁻¹
Práškový plyn:	Argon - 2 l.min ⁻¹
Počet vrstev:	2 vrstvy
Navařovací proud:	120-125 A
Navařovací napětí:	25-30 V
Rychlost navařování:	2,9 cm.min ⁻¹



Obr. 4.3 Po navařování metodou 15

4.3 Varianta č. 3

Tab. 4.3 Parametry navařování

Metoda:	111
Přídavný materiál:	Inconel 625 - elektroda o průměru 3,2 mm
Počet vrstev:	2 vrstvy
Navařovací proud:	65-70 A
Navařovací napětí:	25-30 V
Rychlost navařování:	6,4 cm.min ⁻¹



Obr. 4.4 Po navařování metodou 111

4.4 Varianta č. 4

Tab. 4.4 Parametry navařování

Metoda:	111
Přídavný materiál:	Stellit 6 - elektroda o průměru 4,0 mm
Počet vrstev:	2 vrstvy
Navařovací proud:	95-100 A
Navařovací napětí:	20-25 V
Rychlost navařování:	6,7 cm.min ⁻¹



Obr. 4.5 Po navařování metodou 111

4.5 Varianta č. 5

Tab. 4.5 Parametry navařování

Metoda:	15
Přídavný materiál:	Inconel 625 - drát o průměru 1,2 mm
Ochranný plyn:	Argon - 12 l.min ⁻¹
Plasmový plyn:	Argon - 2 l.min ⁻¹
Počet vrstev:	2 vrstvy
Navařovací proud:	80-85 A
Navařovací napětí:	28-32 V
Rychlost navařování:	2,5 cm.min ⁻¹



Obr. 4.6 Po navařování metodou 15

5 Ověření a vyhodnocení technologií navařování

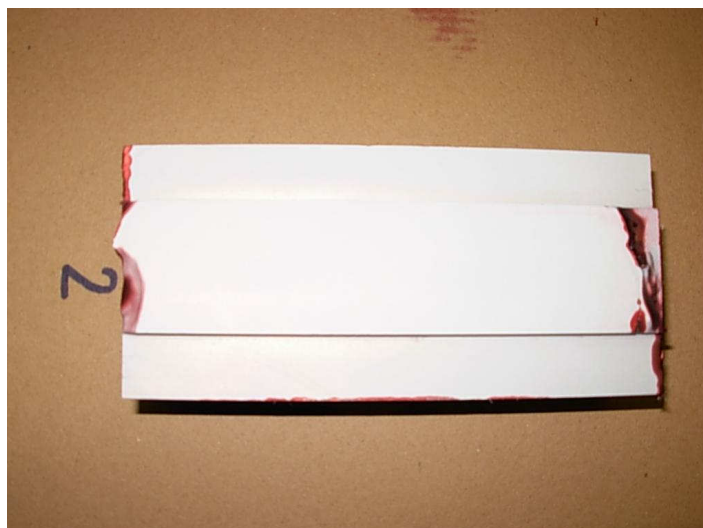
Ověření a vyhodnocení bylo provedeno dle ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July, 2010 [27]. Zkoušky byly provedeny v laboratoři VŠB-TUO a akreditovaných zkušebnách společnosti MSA a.s. Dolní Benešov a Vítkovice Testing Center s.r.o. Před samotným zkoušením byly vzorky obrobny na požadovanou tloušťku návaru 2 mm. V příloze jsou uvedeny příklady protokolů.

5.1 Zkouška kapilární

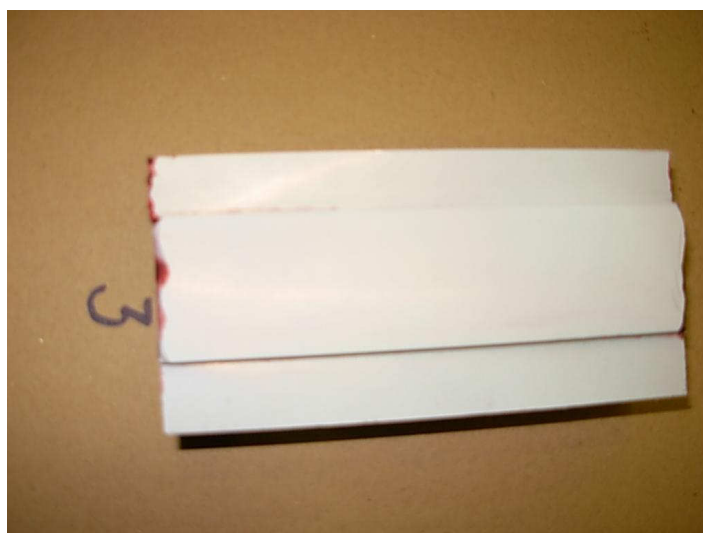
Ke zkoušení a hodnocení došlo v defektoskopickém středisku společnosti MSA a.s. Dolní Benešov. Zkouška byla provedena a hodnocena dle ASME IX QW 195. K detekování vad byl použit speciální čistič MR79, penetrant MR311 a vývojka MR70. Jak je vidět na obrázku č. 5.1, vzorek č. 1 je nevyhovující.



Obr. 5.1 Vzorek č. 1



Obr. 5.2 Vzorek č. 2



Obr. 5.3 Vzorek č. 3



Obr. 5.4 Vzorek č. 4



Obr. 5.5 Vzorek č. 5

5.2 Zkouška ultrazvukem

Zkouška byla provedena na přístroji Krautkrämer USM 35. U této zkoušky se hodnotilo spojení návaru se základním materiálem. Všechny vzorky dosáhly vyhovujících výsledků.

5.3 Zkouška tvrdosti funkční plochy návaru

Měření tvrdosti HRC bylo provedeno na funkční ploše návaru Stellite 6 u vzorků č. 2 a č. 4 na přístroji Gnehm Horgen OM150. Kritériem byla minimální tvrdost 37 HRC.

Tab. 5.1 Tvrdost HRC

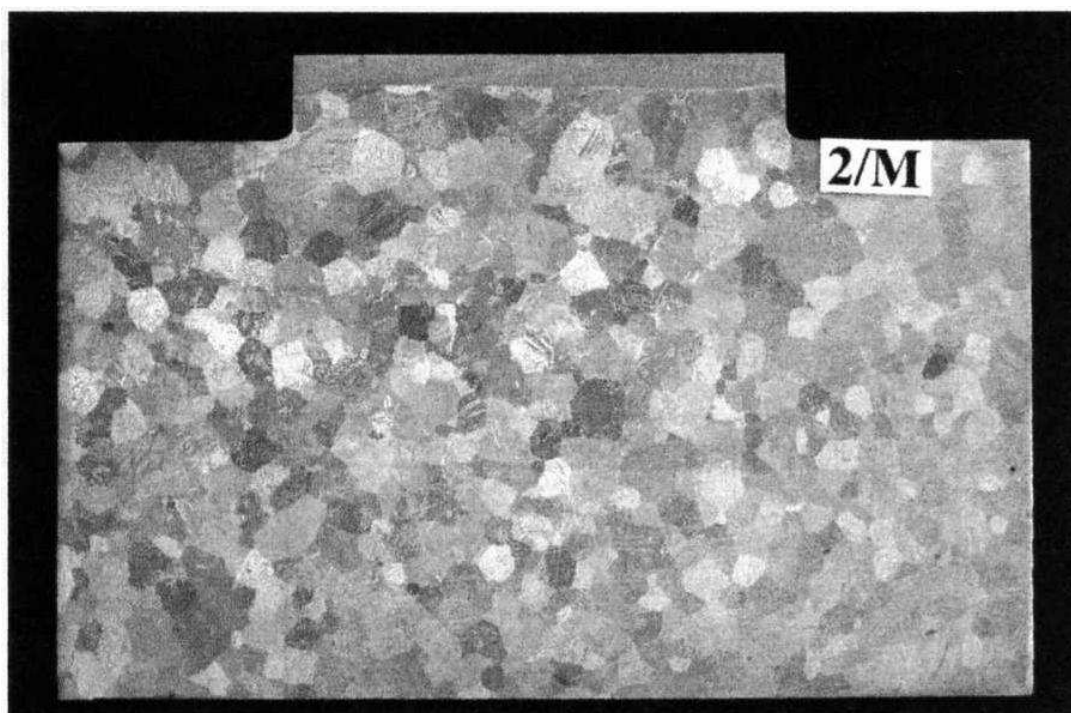
	1	2	3
vzorek č. 2	37,9	38,6	38,3
vzorek č. 4	40,9	41,4	41,2

5.4 Posouzení makrostruktury

Všechny vzorky byly naleptány leptadlem Adler-Matting.

Vzorek č.2

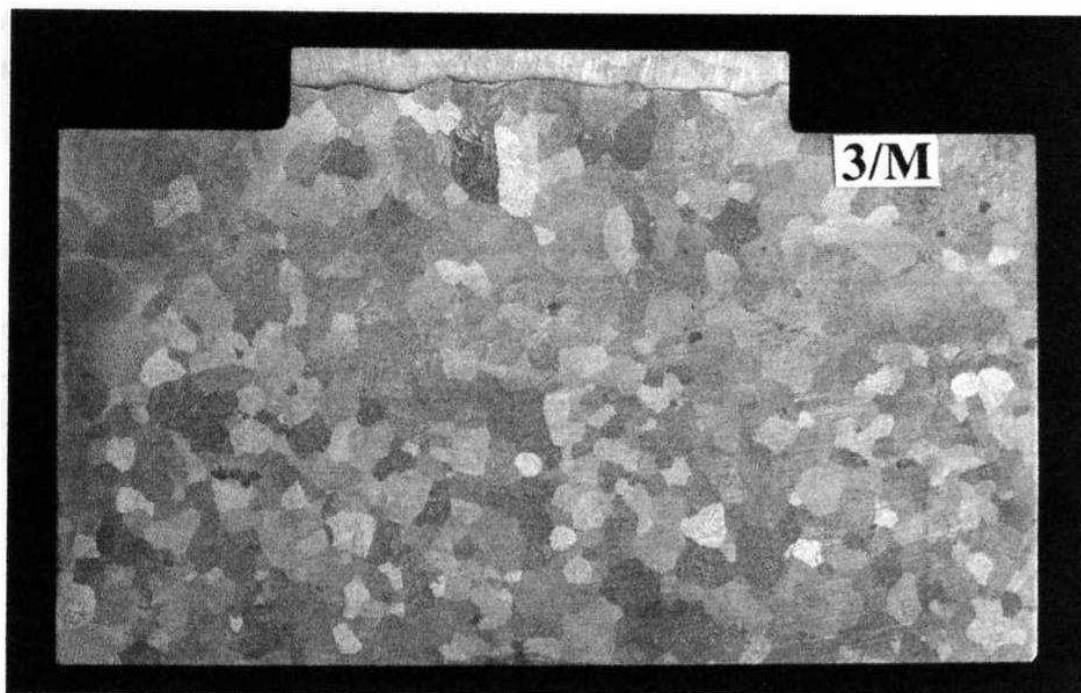
Makrostruktura vzorku neobsahuje žádné vady a je vyhovující.



Obr. 5.6 Makrostruktura vzorku č. 2 (2x)

Vzorek č.3

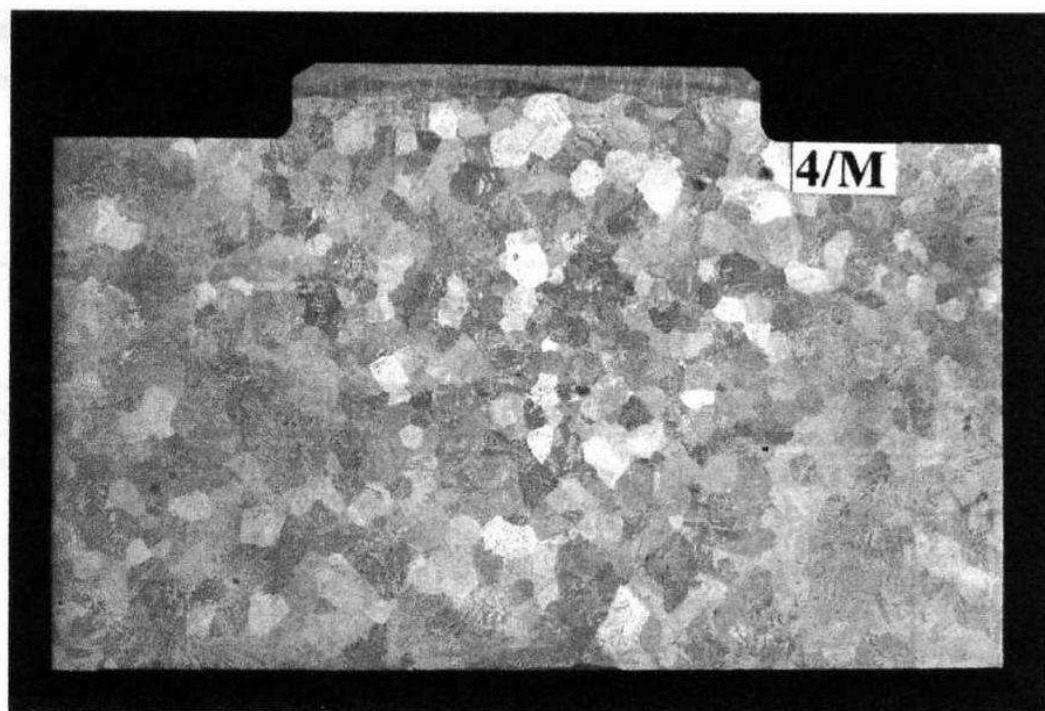
Makrostruktura vzorku neobsahuje žádné vady a je vyhovující.



Obr. 5.7 Makrostruktura vzorku č. 3 (2x)

Vzorek č.4

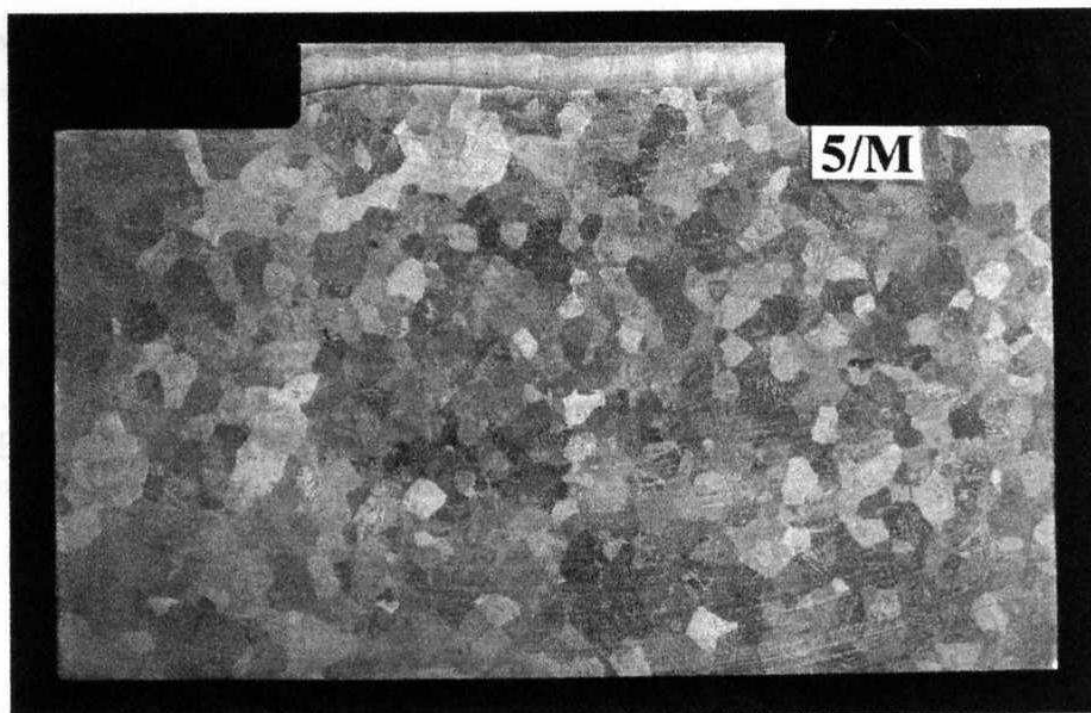
Makrostruktura vzorku neobsahuje žádné vady a je vyhovující.



Obr. 5.8 Makrostruktura vzorku č. 4 (2x)

Vzorek č.5

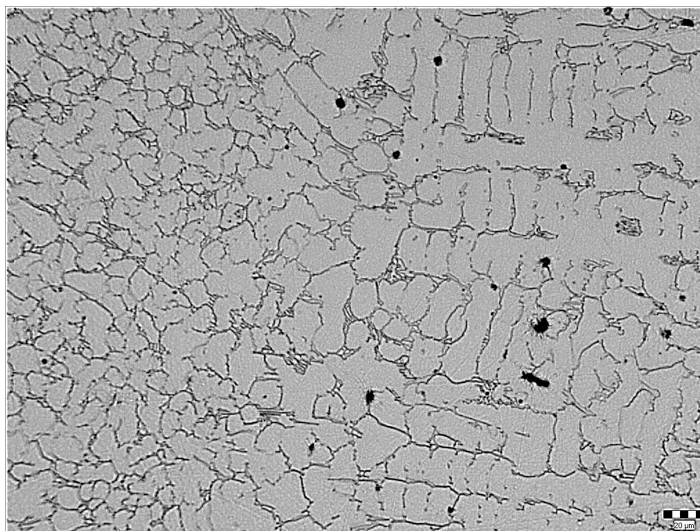
Makrostruktura vzorku neobsahuje žádné vady a je vyhovující.



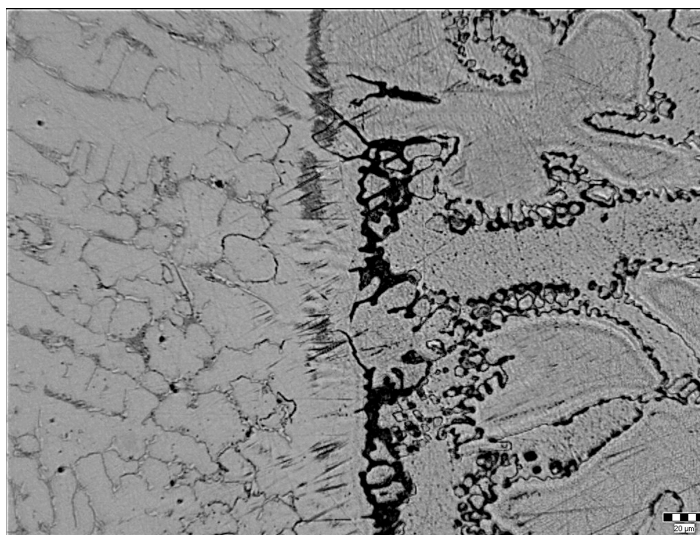
Obr. 5.9 Makrostruktura vzorku č. 5 (2x)

5.5 Posouzení mikrostruktury

Vzorky byly nařezány na stroji Struers Discotom 6. Dále bylo provedeno zalití za tepla a tlaku na přístroji Struers Pronto-press 20. Broušení a leštění probíhalo na přístroji Struers TegraPol 35. Pro naleptání vzorků byla použita leptadla Vilella a Cogne A. V návaru vzorku č.2 se objevují mikro-póry (Obr. 5.11).



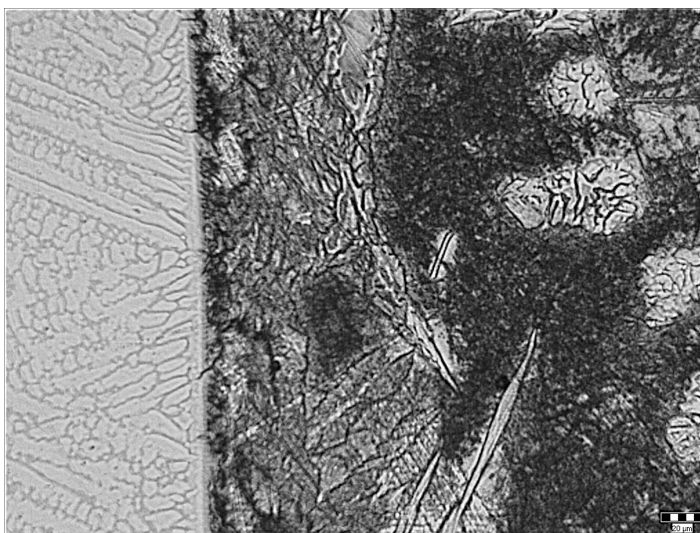
Obr. 5.10 Návar – vzorek č. 2 (200x)



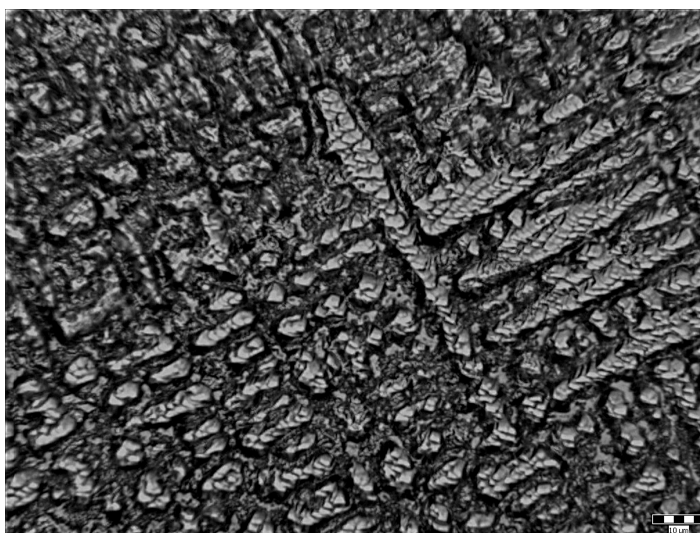
Obr. 5.11 Rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 2 (200x)



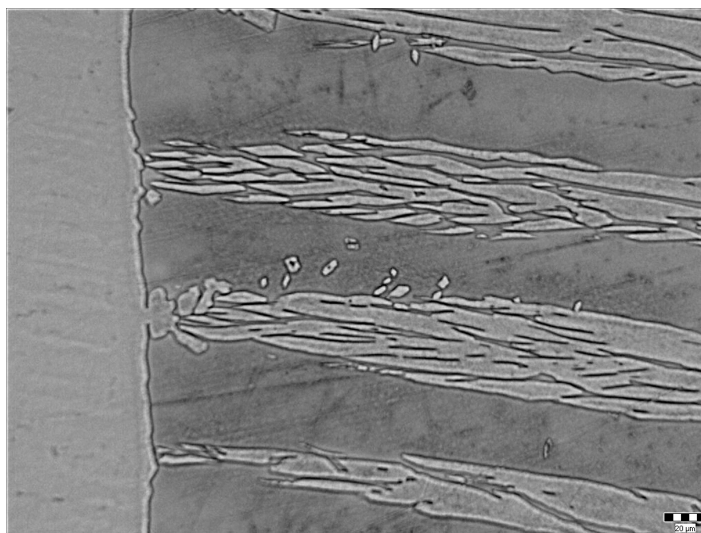
Obr. 5.12 Rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 3 (200x)



Obr. 5.13 Rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 4 (200x)



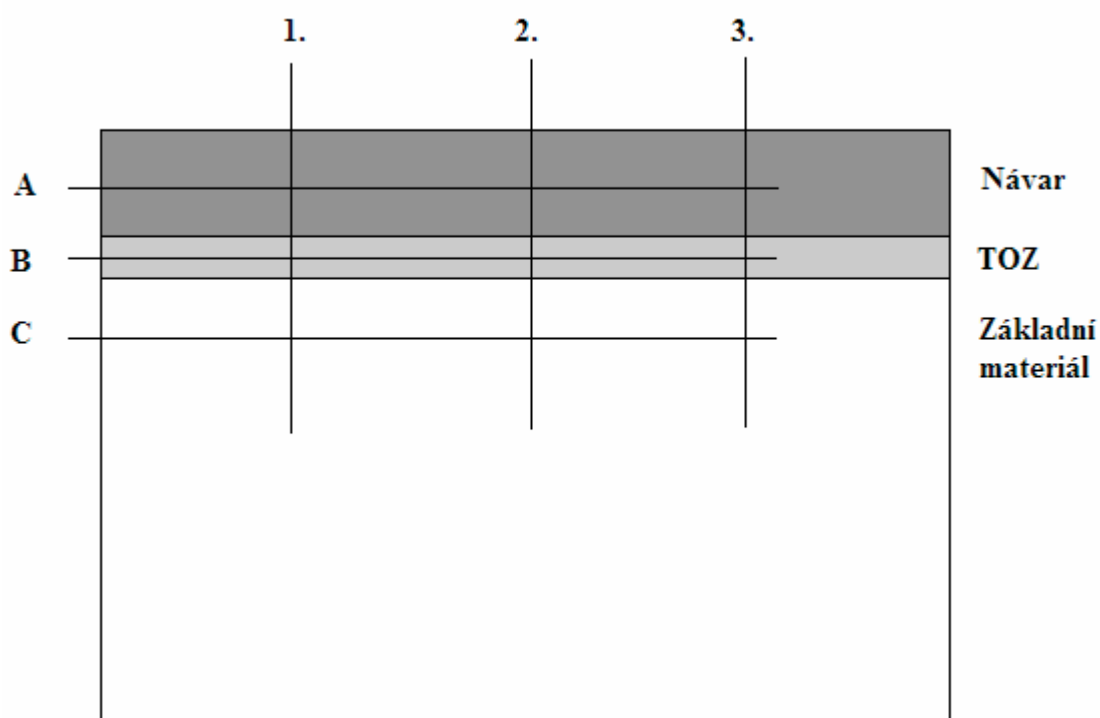
Obr. 5.14 Návar – vzorek č. 5 (500x)



Obr. 5.15 Rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 5 (200x)

5.6 Zkouška tvrdosti na průřezu vzorku

Zkouška byla provedena dle normy ASTM E92 [29] na makrostruktuře vzorků. Na obrázku 5.6 je znázorněno schéma rozmístění vpichů pro měření tvrdosti HV10. Dále jsou uvedeny tabulky s hodnotami tvrdostí HV10 pro jednotlivé vzorky. Tvrdost v oblastech B a C nesmí dosáhnout hodnoty vyšší než 320 HV.



Obr. 5.16 Schéma rozmístění vpichů pro měření tvrdosti

Tab. 5.2 Vzorek č. 2 – tvrdost HV10

	1	2	3
A	525	530	529
B	245	240	240
C	240	253	240

Tab. 5.3 Vzorek č. 3 – tvrdost HV10

	1	2	3
A	242	218	216
B	242	225	245
C	236	227	218

Tab. 5.4 Vzorek č. 4 – tvrdost HV10

	1	2	3
A	446	397	348
B	262	254	243
C	247	218	221

Tab. 5.5 Vzorek č. 5 – tvrdost HV10

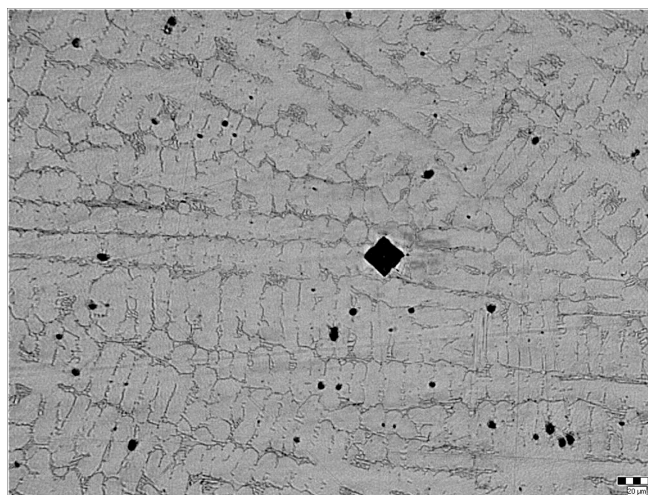
	1	2	3
A	212	210	187
B	243	240	242
C	247	251	235

5.7 Zkouška mikrotvrdosti

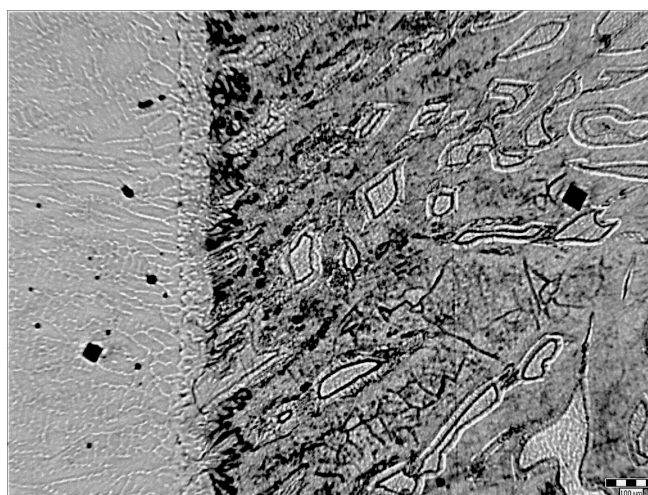
Pro doplnění byla provedena ještě zkouška mikrotvrdosti HV0,1. Měření bylo provedeno na přístroji Leco CM247AT Microhardness Tester. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 0,5 mm.

Tab. 5.6 Mikrotvrdost HV0,1

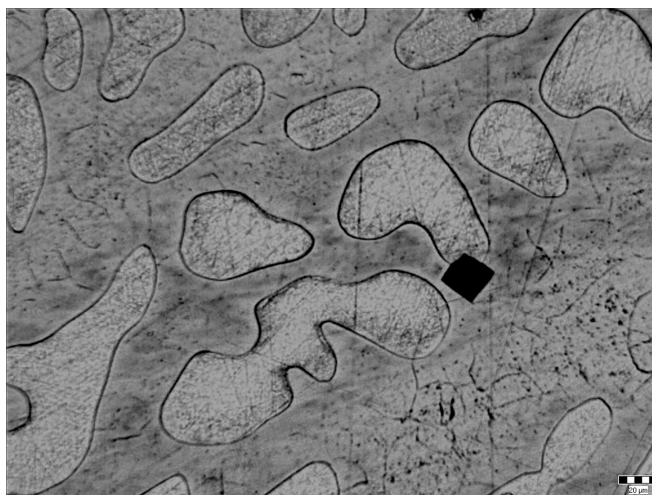
	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
Návar	406	235	346	224
	436	218	461	210
TOZ	251	286	256	222
	213	260	266	265
Základní materiál	249	294	305	284
	228	261	295	284
	228	286	272	268
	257	246	277	270
	236	266	251	257
	231	255	253	257



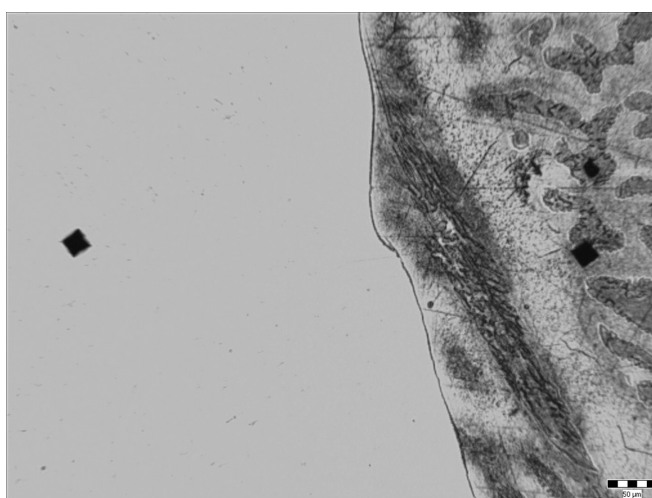
Obr. 5.17 Příklad vpichu v návaru – vzorek č. 2 (200x)



Obr. 5.18 Příklad vpichu na rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 2 (100x)



Obr. 5.19 Příklad vpichu v základním materiálu – vzorek č. 2 (200x)



Obr. 5.20 Příklad vpichu na rozhraní návaru a základního materiálu – vzorek č. 3 (100x)

5.8 Chemická analýza návaru

Tab. 5.7 Chemická analýza návaru vzorku č. 2 v hm. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Co	Fe
0.91	1.23	0.36	27.9	3.17	0.18	4.5	zbytek	6.2

Tab. 5.8 Chemická analýza návaru vzorku č. 3 v hm. %

C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Nb	Fe
0.06	0.09	0.24	0.02	zbytek	22.2	8.5	0.02	0.01	2.95	8.6

Tab. 5.9 Chemická analýza návaru vzorku č. 4 v hm. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Co	Fe
0.93	0.53	0.14	28.7	2.78	0.16	4.2	zbytek	10.6

Tab. 5.10 Chemická analýza návaru vzorku č. 5 v hm. %

C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Nb	Fe
0.04	0.13	0.11	0,02	zbytek	22.1	8.5	0.02	0.02	3.26	8.2

5.9 Ekonomické vyhodnocení

Jako vzorové součástí, pro výpočet nákladů u jednotlivých variant technologií navařování, byly použity klíny DN50 (2“) a DN400 (16“). Náklady nebyly počítány pro variantu č. 1, protože vzorek navařovaný technologií 311, byl po kapilární zkoušce označen jako nevyhovující.

5.9.1 Vstupní hodnoty a příklady výpočtu

Tab. 5.11 Vstupní hodnoty pro klín DN50

	varianta č. 2	varianta č. 3	varianta č. 4	varianta č. 5
Cena láhve plynu (Ar)	1 187 Kč	-	-	1 187 Kč
Spotřeba plynu	16 dm ³ .min	-	-	14 dm ³ .min
Spotřeba přídavného materiálu	0,24 kg	5,5 ks	3 ks	0,2 kg
Cena přídavného materiálu	1820 Kč.kg ⁻¹	47,6 Kč.ks ⁻¹	157,3 Kč.ks ⁻¹	1850 Kč.kg ⁻¹
Čistý čas navařování	13 min	-	-	1,9 min
Celkový čas navařování	15 min	7 min	6 min	3,9 min
Režijní náklady	9,66 Kč.min ⁻¹	6,66 Kč.min ⁻¹	6,66 Kč.min ⁻¹	9,66 Kč.min ⁻¹

Tab. 5.12 Vstupní hodnoty pro klín DN400

	varianta č. 2	varianta č. 3	varianta č. 4	varianta č. 5
Cena láhve plynu (Ar)	1 187 Kč	-	-	1 187 Kč
Spotřeba plynu	16 dm ³ .min	-	-	14 dm ³ .min
Spotřeba přídavného materiálu	3,2 kg	97,5 ks	53,5 ks	2,7 kg
Cena přídavného materiálu	1820 Kč.kg ⁻¹	47,6 Kč.ks ⁻¹	157,3 Kč.ks ⁻¹	1850 Kč.kg ⁻¹
Čistý čas navařování	115 min	-	-	65 min
Celkový čas navařování	117 min	118 min	85 min	67 min
Režijní náklady	9,66 Kč.min ⁻¹	6,66 Kč.min ⁻¹	6,66 Kč.min ⁻¹	9,66 Kč.min ⁻¹

Příklad výpočtu pro variantu č. 2 a klín DN50:

Výpočet ceny 1 dm³ Argonu

Cena láhve Argonu: 1187 Kč

Plynný objem láhve: 10,7 m³ = 10700 dm³

$$\frac{\text{cena}}{\text{objem}} = \frac{1187}{10700} = 0,11 \text{ Kč.dm}^{-3}$$

Celková spotřeba plynu = čistý čas . spotřeba plynu = 13 . 16 = 208 dm³ →
→ cena = 208 . 0,11 = 22,9 Kč

Celkové režijní náklady = celkový čas . režijní náklady = 15 . 9,66 = 145 Kč

Náklady na přídatný materiál = spotřeba příd. materiálu . cena = 0,24 . 1820 = 436,8 Kč

Náklady celkem = 22,9 + 145 + 436,8 = 604,7 Kč

Příklad výpočtu pro variantu č. 3 a klín DN50:

Celkové režijní náklady = celkový čas . režijní náklady = 7 . 6,66 = 46,66 Kč

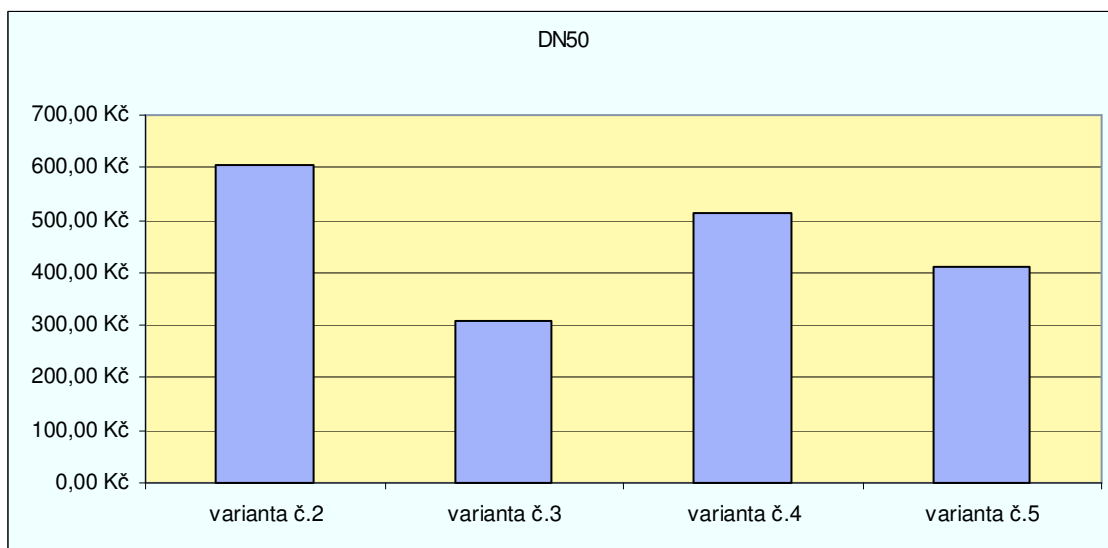
Náklady na přídatný materiál = spotřeba příd. materiálu . cena = 5,5 . 47,6 = 261,8 Kč

Náklady celkem = 46,66 + 261,8 = 308,46 Kč

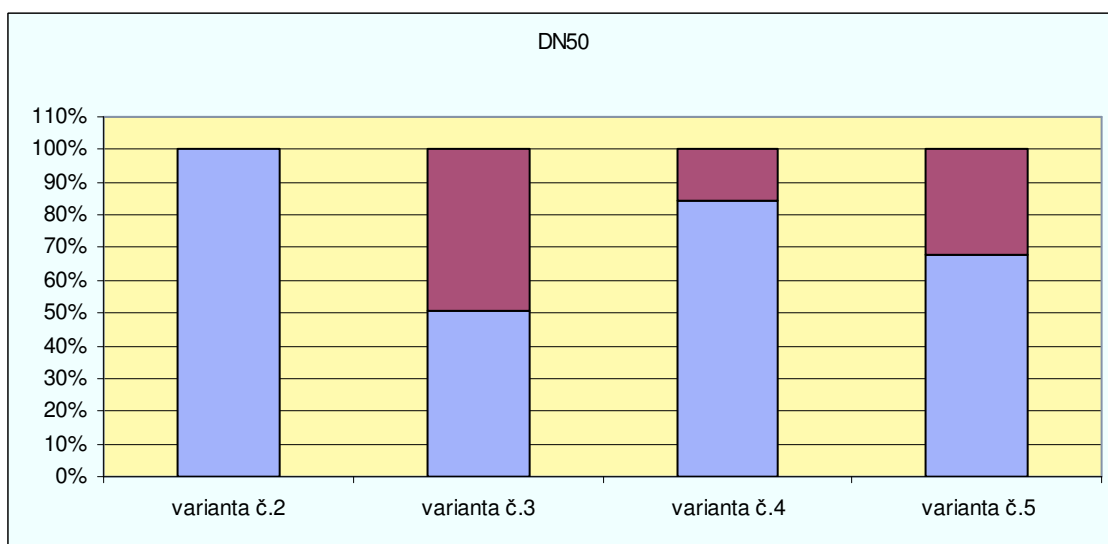
5.9.2 Celkové náklady na jednotlivé varianty

Tab. 5.13 Náklady pro klín DN50

	varianta č. 2	varianta č. 3	varianta č. 4	varianta č. 5
Náklady na plyn	23,90 Kč	-	-	2,90 Kč
Celkové režijní náklady	145,00 Kč	46,66 Kč	40,00 Kč	37,70 Kč
Náklady na přídatný materiál	436,80 Kč	261,80 Kč	471,90 Kč	370,00 Kč
Náklady celkem	605,70 Kč	308,46 Kč	511,90 Kč	410,60 Kč



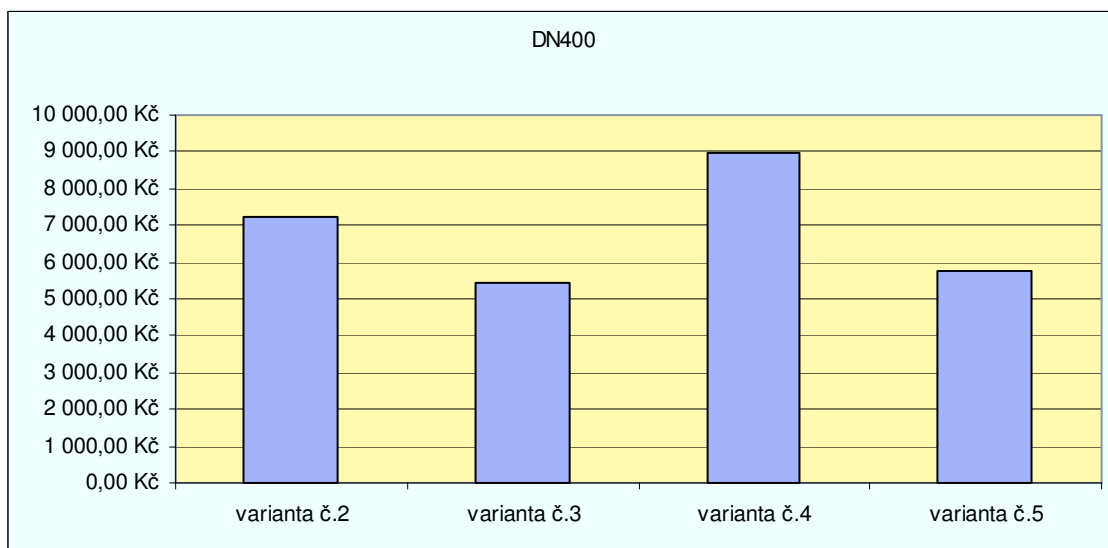
Obr. 5.21 Porovnání nákladů pro klín DN50



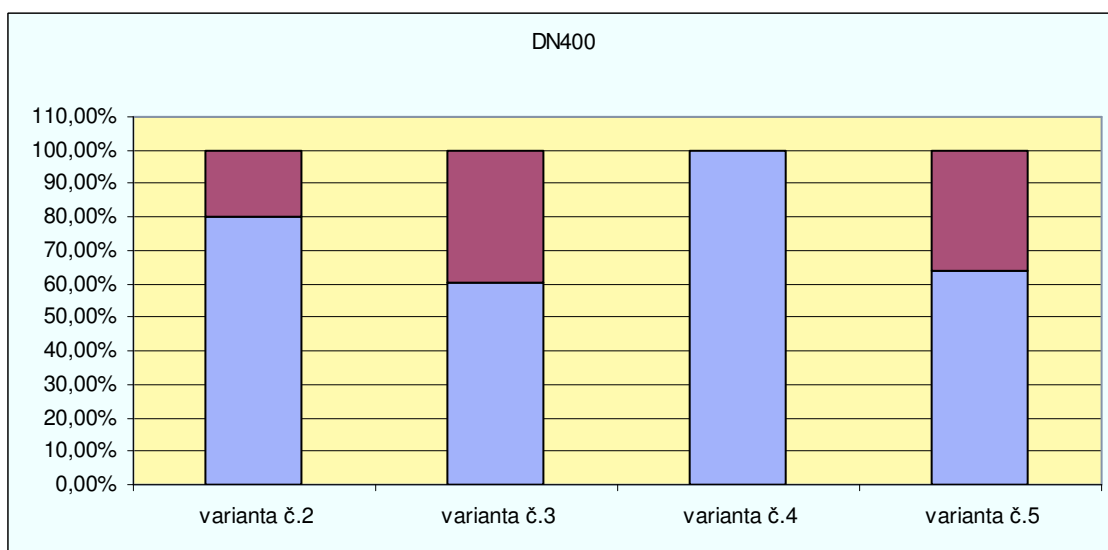
Obr. 5.22 Procentuální srovnání nákladů pro klín DN50

Tab. 5.14 Náklady pro klín DN400

	varianta č. 2	varianta č. 3	varianta č. 4	varianta č. 5
Náklady na plyn	202,40 Kč	-	-	100,10 Kč
Celkové režijní náklady	1 130,20 Kč	786,66 Kč	566,66 Kč	647,66 Kč
Náklady na přídatný materiál	5 824,00 Kč	4 641,00 Kč	8 415,55 Kč	4 995,00 Kč
Náklady celkem	7 156,60 Kč	5 427,66 Kč	8 982,21 Kč	5 742,76 Kč



Obr. 5.23 Porovnání nákladů pro klín DN400



Obr. 5.24 Procentuální srovnání nákladů pro klín DN400

6 Návrh WPS a PQR

Návrhy WPS a PQR pro vybrané technologie jsou vytvořeny v souladu s ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July, 2010. Tyto návrhy obsahují přílohy č. 2, č. 3, č. 4 a č. 5.

7 Zhodnocení výsledků navařování

Výchozím úkolem této práce bylo určení technologií, kterými společnost MSA a.s. Dolní Benešov disponuje a které jsou vhodné pro navařování těsnících ploch armatur. Mezi tyto technologie tedy patří navařování plamenem (311), ruční navařování obalenou elektrodou (111) a navařování plazmou (15). Dále došlo k výběru přídatného materiálu pro návar. Vybrán byl Stellite 6, který je odolný proti opotřebení, a korozivzdorný návar Inconel 625.

Byly provedeny návary na 5 vzorků. Po kapilární zkoušce byl vyřazen vzorek č.1, který vykazoval indikace v návaru, jak je vidět na obr. 5.1. S tímto vzorkem se dál nepracovalo. Ostatní vzorky byly podrobeny zkoušce ultrazvukem. Na vzorcích č. 2 a č. 4, navařovaných Stellite 6, byla měřena tvrdost funkční plochy návaru, kdy hlavním kritériem byla hodnota min. 37 HRC, kterou tyto vzorky splnily. Následovalo posouzení makrostruktury a mikrostruktury vzorků. U vzorku č. 2 bylo objeveno několik mikro-pórů, u vzorků č. 2 a č. 3 byl nalezen terciální cementit na hranicích zrn. Všechny vzorky byly vyhovující. Dále bylo provedeno měření tvrdosti a mikrotvrdosti na průřezu vzorku. Maximální možnou tvrdostí v oblastech B a C byla stanovena hodnota 320HV. Toto kritérium bylo splněno u všech 4 vzorků. Poslední zkouškou byla analýza chemického složení návarů. Výsledky analýzy všech vzorků byly vyhovující.

Následovalo ekonomické vyhodnocení jednotlivých variant návarů. V tomto srovnání bylo počítáno s náklady na plyn (pokud byl použit). Dále s náklady na přídatný materiál a s režijními náklady (zde patří náklady na mzdy, energii, cenu stroje, odpisy apod.). Vzorovou součástí pro výpočet nákladů byl klín DN50 a DN400, kdy vzhledem k objemu výroby ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov, byl směrodatný výsledek nákladů pro klín DN400. Po porovnání celkových nákladů na jednotlivé technologie došlo k výběru nejvýhodnějších variant. Vybrána byla varianta č. 2 pro návary Stellite 6 a varianta č. 3 pro návary Inconelem 625.

K vybraným variantám byly zpracovány protokoly WPS a PQR uvedené v přílohách. Na základě těchto protokolů budou ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov zpracovány technologické postupy pro navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývá svařitelností duplexních ocelí a jejich možnostmi využití v technické praxi. V první části práce jsou definovány vhodné technologie navařování. V kapitole 3 jsou navrženy varianty technologií pro navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí.

Na základě výsledků zkoušek a ekonomického vyhodnocení byly zvoleny 2 varianty navařování těsnících ploch, ke kterým pak byly vytvořeny příslušné protokoly WPS a PQR. Tyto protokoly budou sloužit ve společnosti MSA a.s. Dolní Benešov jako základní prvek pro vytvoření technologických postupů navařování těsnících ploch armatur z duplexních ocelí.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval za cenné rady a usměrnění mé práce svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivo Hlavatému, Ph.D. Také bych rád poděkoval panu Ing. Břetislavu Binarovi a celé společnosti MSA a.s. Dolní Benešov za poskytnutí vzorků, podkladů, protokolů, důležitých poznatků a odborných rad z praxe. Nakonec bych také rád poděkoval paní Ing. Xenii Ševčíkové a Ing. Ivaně Šajdlerové, Ph.D. za jejich čas a rady, své rodině a přátelům za podporu.

9 Seznam použitých pramenů

- [1] GUNN, Robert N. *Duplex stainless steels-Microstructure, properties and applications*. Abington publishing. Cambridge England, 1997.
- [2] *How to weld duplex stainless steels*. [online]. Avesta, Švédsko: Avesta Welding AB, 2006. [cit. 2009-05-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.avestawelding.com/3756.epibrw>>
- [3] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*, VŠB-TUO Ostrava. 2005. 133s. ISBN 80-248-0870-6
- [4] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*, Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava. 2009. 241s. ISBN 978-80-248-2025-5
- [5] *How to Weld Type 2205 Code Plus Two® Duplex Stainless Steel*. [online]. Outokumpu Stainless, Inc. 2004. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.outokumpu.com/35058.epibrw>>
- [6] BAJDA, M. *Navařování kovů*. [online]. Hadyna – International, spol. s r.o. 2007. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_complete.pdf>
- [7] KUBÍČEK, J. *Renovace a povrchové úpravy*, [online]. VUT Brno. 2006. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_uprav_y__kubicek.pdf>
- [8] *Inconel alloy 625* [online]. 2007. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.hpalloy.com/alloys/descriptions/INCONEL625.html>>
- [9] *Plazmové navařovací automaty řady PPC 250* [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.kskct.cz/web/podstranka.php?jazyk=cz&odkaz=plazma>>
- [10] GURYČA, A. *Pro laser*. [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.prolaser.kvalitne.cz/direction.php?str=2>>
- [11] *TIG/Oxy Acetylene* [online]. 2010. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/TIGOxyAcetylene/tabid/70/Default.aspx>>
- [12] *PTA* [online]. 2010. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/PTA/tabid/73/Default.aspx>>

- [13] *Laser Welding* [online]. 2010. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/LaserWelding/tabid/74/Default.aspx>>
- [14] *Duplex Stainless Steel*. [online]. Outokumpu Stainless AB, Avesta Research Centre. 2010. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.outokumpu.com/42257.epibrw>>
- [15] MESSER, B., OPREA, V., WRIGHT, A. *Duplex stainless steel welding: best practices* [online]. 2007. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<http://www.stainless-steel-world.net/pdf/SSW_Fluor_LR.pdf>
- [16] PETTERSSON, C., FAGER, S. *Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507*. [online]. Švédsko: AB Sandvik Steel. 1995. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<[http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/Internet/se01280.nsf/266bc9ad3a821442c1256e970030c378/ecd132de31b33bd085256bd5006d666b/\\$FILE/Welding%20Practice%20for%20Sandvik%20Duplex.pdf](http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/Internet/se01280.nsf/266bc9ad3a821442c1256e970030c378/ecd132de31b33bd085256bd5006d666b/$FILE/Welding%20Practice%20for%20Sandvik%20Duplex.pdf)>
- [17] *Welding Consumables for Nickel-Base Alloys* [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.mipco.com/Welding/DatasheetsView.aspx?SubgroupID=5d5c02b2-b4b9-4799-9d3e-6c4feb7bfa44&Locale=en-US>>
- [18] UNUCKA, P., BOŘUTA, A. *Materiálové parametry svařitelnosti vysokolegovaných materiálů*. [online]. 2008. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.nanocon.cz/data/metal2008/sbornik/Lists/Papers/031.pdf>>
- [19] *Stellite 6* [online]. 2011. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.stellite.com/ProductsServices/HardfacingAlloys/CoredWeldingWire/TubularWire/Stellite6/tabid/153/Default.aspx>>
- [20] *Svařování, navařování a renovace nástrojových ocelí*. [online]. 2005. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.wirpo.cz/cs/c/aktuality/svarovani--navarovani-a-renovace-nastrojovych-oceli.htm>>
- [21] *Renovace hřídelí v ochranné atmosféře*. [online]. 2009. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <http://www.elsevservis.cz/cz/cz_b_16.asp>

- [22] ŽÁK, V. *Navařování pojezdových kol*. Ostrava: Katedra konstruování a výrobních zařízení, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1999. 35s. Bakalářská práce, vedoucí: Rozum, K.
- [23] ŠEVČÍKOVÁ, P. *Duplexní oceli, jejich rozdělení a vlastnosti*. Ostrava: Katedra materiálového inženýrství, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. 28s. Bakalářská práce, vedoucí: Kubečka, P.
- [24] *Guidelines for hardfacing onto steels* [online]. 2007. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Guidelines%20for%20hardfacing%20onto%20steels.pdf>>
- [25] *MSA Výrobce armatur*. [online]. 2008. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <www.msa.cz>
- [26] *Stellite 6 final*. [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf>>
- [27] ASME CODE Sect. IX, edition 2010, addenda July 2010
- [28] *Welding consumables* [online]. 2006. [cit. 2011-05-02]. Dostupné z WWW: <http://www.utp.de/english/files/UTP_Manual_August_2006.pdf>
- [29] ASTM E92 ed.2. *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. 2003

10 Seznam příloh

- Příloha č. 1: Materiálové osvědčení
- Příloha č. 2: Návrh WPS pro variantu č. 2
- Příloha č. 3: Návrh PQR pro variantu č. 2
- Příloha č. 4: Návrh WPS pro variantu č. 3
- Příloha č. 5: Návrh PQR pro variantu č. 3
- Příloha č. 6: Protokol kapilární zkoušky
- Příloha č. 7: Protokol zkoušky ultrazvukem
- Příloha č. 8: Protokol posouzení makrostruktury
- Příloha č. 9: Protokol k měření tvrdosti